

ISSN 0013-5380



# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

**1987**

•ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

**4**

УДК 621.359.48:621.373

## Электрические воздействия на тиристорный источник импульсного питания в электрофильтре газоочистки

ГРИНШТЕЙН Б. И., канд. техн. наук, ЖМУРОВ В. П., инж., ТИМОШЕНКО А. Л., канд. техн. наук,  
БЕЗУГЛЫЙ С. Л., инж., КОТЛЯР В. П., инж.

Одной из важнейших задач по защите окружающей среды от вредных выбросов различных дымовых газов по-прежнему является повышение степени их очистки, достигаемое различными способами, и, в первую очередь, с помощью электрических фильтров (ЭФ). Одним из способов повышения эффективности работы ЭФ является их питание напряжением со специальной формой кривой — так называемый способ импульсного питания, заключающийся в том, что на выпрямленное напряжение питания ЭФ накладывается импульсное напряжение [1]. Результаты исследований импульсных источников питания (ИИП), в основном направленных на повышение эффективности технологического процесса газоочистки, опубликованы в [2—4].

Однако практика показывает, что нужны более детальные исследования режимов работы электрофильтра ИИП с целью уточнения расчетной модели такого ИИП и анализ электрических воздействий на полупроводниковые вентили в режимах искровых и дуговых пробоев ЭФ.

На рис. 1 представлена принципиальная схема ИИП, где  $T_1$  — однофазный тиристорный регулятор переменного тока;  $T_p$  — силовой высоковольтный трансформатор;  $D_1$  — диодный выпрямительный мост;  $C_1$  — накопительный конденсатор;  $L_3, R_3$  — параметры цепи ограничения токов к. з. при пробоях в нагрузке;  $T_2$  — высоковольтный тиристорный ключ;  $D_2$  — высоковольтный обратный диод;  $D_3$  — варисторный ограничитель напряжения;  $L_2$  — индуктивность для обеспечения необходимого времени восстановления тиристорами ключа управляющей способности;  $L_1$  — индуктивность колебательного контура для создания на нагрузке определенной формы кривой напряжения;  $C_2$  — конструкционная емкость ЭФ;  $ДН$  — делитель напряжения;  $СУ$  — система управления высоковольтным тиристорным ключом  $T_2$ ;  $СУР$  — система управления и автоматического регулирования тиристорным регулятором  $T_1$ .

В [3] достаточно подробно описывается работа ИИП. Показано, что при анализе процессы в схеме ИИП могут быть условно разделены на низко- и высокочастотные и рассматриваться при этом независимо друг от друга. Низкочастотные процессы возникают в схеме тиристорного регулятора переменного тока  $T_1$ , нагруженного на  $RLC$ -контур (при выключенном ключе  $T_2$ ). Анализ таких схем подробно выполнен в [5], при этом основным является определение критического угла управления  $\alpha_{кр}$ , при котором ток через регулятор непрерывен. Значение этого угла определяется соотношениями емкости и индуктивности рассматриваемого контура.

Спецификой ЭФ как нагрузки, питаемой от традиционного источника выпрямленного напряжения отрицательной полярности, является необходимость ограничения напряжения разрядного промежутка электродов ЭФ ниже пробивных напряжений ( $U_{пр}$ ), что и определяет углы управления регулятора  $T_1$ . В выпускаемых в настоящее время промышленностью ЭФ указанное пробивное напряжение  $U_{пр} \leq 50$  кВ, а амплитуда напряжения питающего трансформатора составляет  $U_m = 80 \div 100$  кВ. Следовательно, диапазон угла регулирования лежит в пределах  $0 \leq \alpha \leq 40^\circ$ , причем длительность протекания тока через тиристоры регулятора переменного тока  $T_1$  меньше значения  $\alpha$ . Узкий диапазон угла регулирования является существенным недостатком традиционных источников питания, так как при этом установленная мощность питающего трансформатора используется лишь на 20—30 %.

При применении ИИП весь основной эффект зарядки пыли получается за счет импульса напряжения, накладываемого на постоянное напряжение определенного уровня. Поскольку импульсная прочность разрядного промежутка, создающего резко неоднородное электрическое поле, существенно выше прочности этого промежутка на постоянном напряжении при импульсном питании ЭФ, на накопительной емкости можно поддержи-

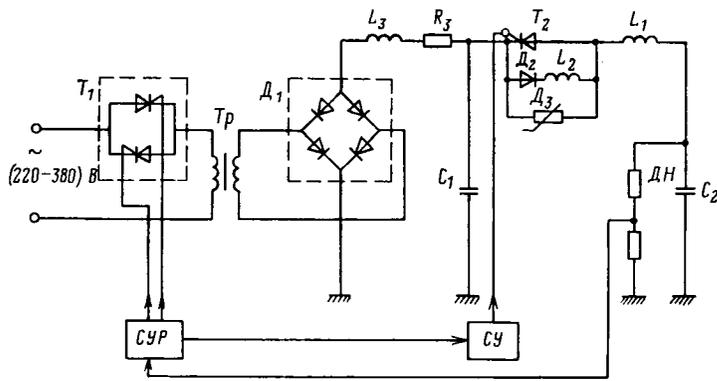


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема тиристорного источника импульсного питания электрофилтра газоочистки

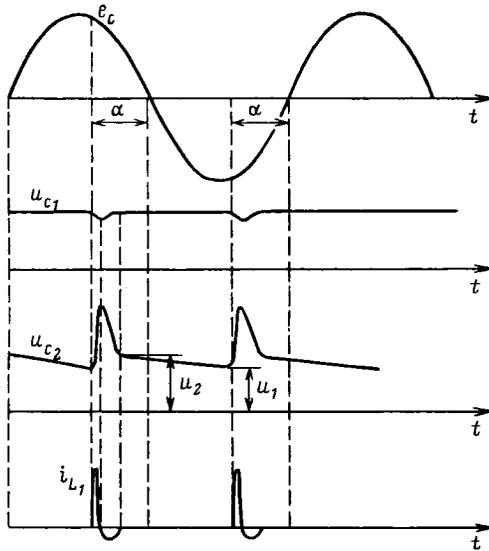


Рис. 2. Диаграммы работы тиристорного источника импульсного питания

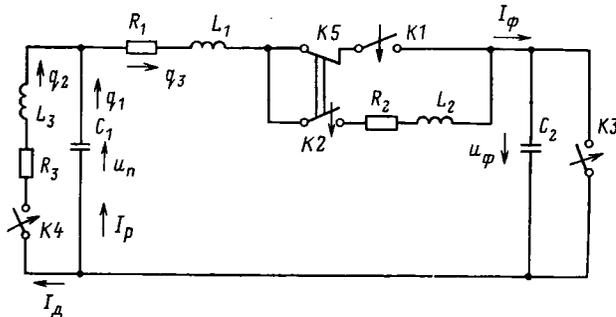


Рис. 3. Эквивалентная расчетная схема

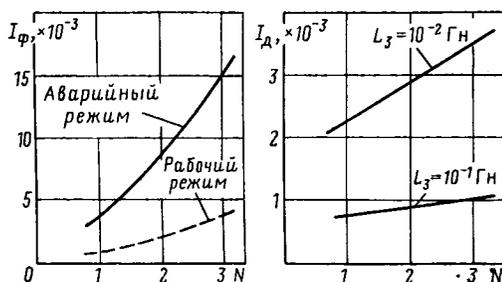


Рис. 4. Зависимость максимальных токов в схеме тиристорного источника питания от типоразмера электрофилтра

вать напряжение несколько выше напряжения начала короны в разрядном промежутке, которое будет существенно ниже пробивного напряжения промежутка на постоянном напряжении, а импульс напряжения требуемой формы и амплитуды формировать колебательным контуром  $C_1 - L_1 - C_2$  при разряде накопительной емкости через ключ  $T_2$ .

Таким образом, ИИП позволяет увеличить угол управления регулятором переменного тока до  $170^\circ$ , что соответствует увеличению до тех же пределов длительности протекания тока через тиристоры регулятора; снизить напряжение вторичной обмотки трансформатора, его установленную мощность и уменьшить в 5–6 раз потребление энергии на газоочистку при одновременном снижении массы и габаритов установки.

Временные диаграммы работы ИИП при отсутствии пробоев в ЭФ иллюстрирует рис. 2.

Менее исследованы и поэтому представляют больший интерес электромагнитные процессы, протекающие на высокой стороне трансформатора при работе ключа  $T_2$ , т. е. разряд накопительной емкости на электроды ЭФ. На рис. 3 приведена электрическая схема, составленная на основании схемы рис. 1 и эквивалентирующая электромагнитные процессы в электрофилтре газоочистки, при этом  $R_1$  и  $R_2$  — собственные активные сопротивления индуктивностей  $L_1$  и  $L_2$ .

При составлении математической модели, описывающей процессы в ЭФ, приняты следующие допущения:

1) питающая сеть отделена от накопительного конденсатора индуктивностью трансформатора, значение которой существенно больше индуктивностей  $L_1 \div L_3$  и поэтому полагаем, что питающая сеть не влияет на переходные процессы в ЭФ;

2) тиристорный ключ  $T_2$ , обратные диоды  $D_2$  и диоды  $D_1$  моста зарядной цепи включаются и выключаются мгновенно;

3) при аварийных процессах в ЭФ (искровые и дуговые пробои) напряжение на емкости  $C_2$  мгновенно падает до нуля;

4) на емкости  $C_2$  в нормальных режимах напряжение не снижается ниже напряжения  $U_{к0}$  начала короны.

Таким образом, в эквивалентной схеме включение и выключение тиристорного ключа моделируется замыканием — размыканием идеального ключа  $K1$ , включение обратного диода и диодов зарядного моста — замыканием ключей  $K2$ ,  $K4$ , а аварийные процессы — замыканием ключа  $K3$ .

При указанных на схеме рис. 3 направлениях зарядов в ветвях схемы переходные процессы в схеме ЭФ описываются системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_1 &= \dot{q}_3 - \dot{q}_2 K_4; \\ \ddot{q}_2 &= \frac{1}{L_3} \left( \frac{q_1}{C_1} - \dot{q}_2 R_3 \right) K_4; \\ \ddot{q}_3 &= -\frac{1}{L_1 + K_2 L_2} \left[ \frac{q_1}{C_1} + \frac{q_3}{C_2} K_3 + \dot{q}_3 (R_1 + K_2 R_2) \right], \end{aligned} \right\} (1)$$

при этом

$$\dot{q} = \frac{dq}{dt}; \quad \ddot{q} = \frac{d^2 q}{dt^2}.$$

После замены переменных

$$y_1 = q_1; \quad y_2 = q_2; \quad y_3 = \dot{q}_2; \quad y_4 = q_3; \quad y_5 = \dot{q}_3 \quad (2)$$

система уравнений (1) приводится к каноническому ви-

Типоразмер ЭФ	$C_1$ , мкФ	$C_2$ , мкФ	$L_1$ , мГн	$R_1$ , Ом	$L_2$ , мГн	$R_2$ , Ом
1	0,15	0,04	5,25	4,2	65	48
2	0,3	0,07	3,3	2,6	45	33
3	0,6	0,16	1,63	1,5	25	20

ду для решения ее на ЭВМ численными методами интегрирования:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= y_5 - y_3 K4; \\ y_2 &= y_3 K4; \\ y_3 &= \frac{1}{L_3} \left( \frac{y_1}{C_1} - y_3 R_3 \right) K4; \\ y_4 &= y_5; \\ y_5 &= -\frac{1}{L_1 + K2L_2} \left[ \frac{y_1}{C_1} + \frac{y_4}{C_2} K3 + y_5 (R_1 + K2R_2) \right]. \end{aligned} \right\} (3)$$

В результате расчетов определяются токи:  $I_p = y_1$  — в цепи разряда накопительной емкости;  $I_\phi = y_5$  — в цепи ЭФ;  $I_d = y_3$  — в цепи диодов выпрямительного моста (при пробое ЭФ) и напряжения:  $U_\phi = y_4/C_2$  — на ЭФ;  $U_\pi = y_1/C_1$  — на накопительной емкости  $C_1$ .

Ключ  $K2$  замыкается одновременно с размыканием ключа  $K1$  и его коммутация математически записывается как

$$K2 = \frac{1}{2} [1 + \text{sign}(y_5)],$$

т. е.  $K2$  замыкается в момент изменения знака  $y_5$ .

Момент пробоя ЭФ определяется замыканием ключа  $K3$ :

$$K3 = \frac{1}{2} [1 - \text{sign}(U_\phi - U_{пр})],$$

где  $U_{пр}$  — напряжение пробоя.

При изменении знака напряжения на накопительной емкости (при процессах после пробоя ЭФ) включается ключ  $K4$ :

$$K4 = \frac{1}{2} [1 - \text{sign}(U_\pi)].$$

В настоящее время в промышленной эксплуатации находятся ЭФ, отличающиеся между собой общим объемом и межэлектродным расстоянием. В соответствии с этим все электрофильтры можно разбить на три типоразмера (габарита), имеющих различную собственную емкость. В таблице приведены параметры ЭФ и соответствующие им параметры ИИП для указанных габаритов ЭФ.

Для приведенных в таблице параметров ЭФ на ЦВМ были проведены расчеты системы уравнений (3) методом Эйлера — Коши с итерациями. При расчетах за базисную величину (единицу) принято начальное напряжение на накопительной емкости, поэтому все величины получены в относительных единицах. Для получения фактических значений необходимо величины в относительных единицах умножить на масштабный коэффициент, равный значению напряжения  $U_\pi$  на накопительной емкости (в вольтах).

Соотношение между напряжением на накопительной емкости и напряжением начала короны принято равным  $U_\pi/U_{ю} = 2$ , что близко к реальному соотношению этих напряжений в практике работы ЭФ.

Начальные условия расчетной схемы определяются предварительными зарядами накопительной емкости и емкости ЭФ, т. е. при принятом соотношении

$$U_{C1}/U_{C2} = U_\pi/U_{ю} = 2$$

$$y_1(0) = q_1(0) = C_1;$$

$$y_2(0) = -q_3(0) = -0,5C_2.$$

Для оценки влияния защитной индуктивности  $L_3$  на ток через диоды выпрямительного моста в режиме пробоя ЭФ расчеты проведены для двух предельных значений этой индуктивности —  $L_3 = 10^{-2}$  Гн и  $L_3 = 10^{-1}$  Гн. Полученная математическая модель процессов в ЭФ позволяет рассчитывать как рабочие, так и аварийные процессы в ЭФ.

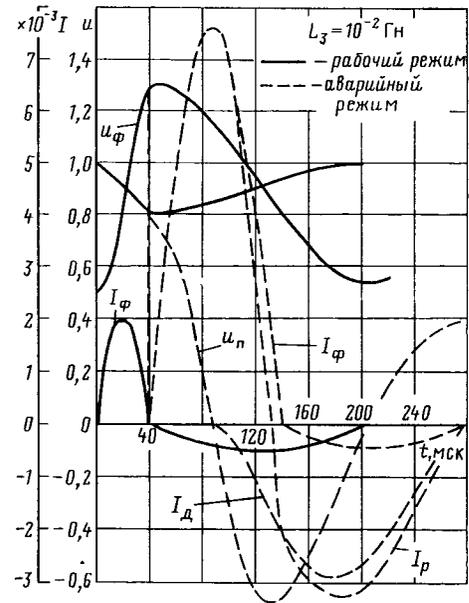


Рис. 5. Расчетные значения токов и напряжений в схеме тиристорного источника импульсного питания электрофильтра второго габарита

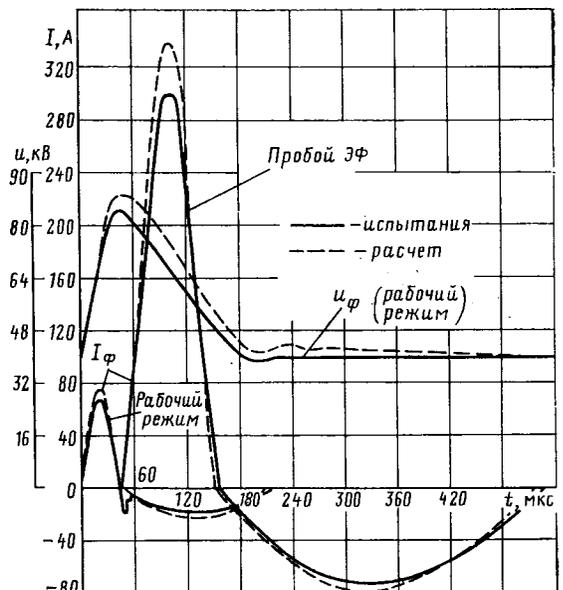


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные воздействия на тиристорный источник импульсного питания электрофильтра

На рис. 4, а приведена зависимость тока  $I_\phi$  через ЭФ от типоразмера  $N$  в рабочем и аварийном режимах, а на рис. 4, б — тока  $I_d$  через диоды выпрямительного моста в аварийном режиме. На рис. 5 в качестве примера приведены кривые токов и напряжений в схеме ЭФ второго типоразмера в рабочих и аварийных режимах<sup>1</sup>.

Наиболее тяжелые токовые воздействия на элементы тиристорного ключа, обратные диоды и диоды выпрямительного моста возникают в ЭФ третьего габарита вследствие значительных значений емкости накопительного конденсатора и собственной емкости ЭФ. Напряжение на ЭФ в рабочих режимах для всех типоразмеров ЭФ возрастает до 1,3 напряжения накопительного конденсатора, время нарастания этого напряжения до амплитудного значения приблизительно 40 мкс, а время спада до напряжения начала короны — около 150 мкс.

При пробое в ЭФ с момента начала перезаряда накопительного конденсатора  $C_1$  ток пробоя коммутируется на цепь, состоящую из вентиля мостового выпрямителя и защитной цепи  $L_3, R_3$ . Амплитуда этого тока и его длительность определяются параметрами  $L_3, R_3$  защитной цепи. Расчеты показывают, что токовые воздействия (особенно для ЭФ третьего габарита) на слаботочные вентили моста могут превышать допустимые и приводить к повреждению этих вентилях.

Пробивное напряжение ЭФ является статистической величиной, зависящей от многих факторов: степени запыленности, химического состава пыли, скорости нарастания напряжения на коронирующем электроде, состояния электродов и т. д. Поэтому пробой может происходить как на фронте, так и на амплитуде или спаде импульса напряжения, формируемого разрядным контуром. Расчеты показывают, что амплитуда тока через ЭФ при его пробое в зависимости от момента пробоя меняется несущественно — не более чем на 15 % (на рис. 5 пробой происходит на амплитуде импульса).

Наиболее тяжелым и неблагоприятным случаем является пробой ЭФ в момент неполного восстановления управляющей способности тиристорного ключа  $T_2$ . При этом на выключившихся тиристорах напряжение скачком нарастает до напряжения стабилизации (лавиннообразования) защитных лавинных ограничителей (варисторов) и ток пробоя ЭФ коммутируется на них. Конечно, такая модель выключения цепочки последовательно включенных тиристоров является достаточно грубой, однако она позволяет, не прибегая к описанию сложных процессов выключения такой цепочки, получить предельные значения энергии, выделяемой в защитных ограничителях тиристоров при аварийных ситуациях на ЭФ.

Ток, протекающий через ЭФ при его пробое, с достаточной степенью точности можно описать полуволной синусоиды:  $i_\phi = I_\phi \sin \omega t$ . Полагаем, что весь этот ток протекает через ограничители цепи защиты включившихся тиристоров. Тогда в ограничителях выделится энергия

$$W = \int_0^{T/2} u(t) i_\phi(t) dt$$

или, учитывая что напряжение на ограничителе в режиме стабилизации практически равно напряжению ста-

билизации  $U_0$ ,

$$W = U_0 \int_0^{T/2} i_\phi(t) dt = U_0 \int_0^{T/2} I_\phi \sin \omega t dt = \frac{U_0 I_\phi T}{\pi},$$

где  $T$  — период синусоиды.

Тиристоры ключа защищены оксидно-цинковыми варисторами типа СН2-2, которые способны рассеивать энергию единичного импульса тока 300—400 Дж [6].

Для ЭФ третьего габарита амплитуда тока при пробое ЭФ составляет  $I_\phi = 14,87 \cdot 10^{-3}$  относительных единиц при длительности полуволны синусоидальной формы  $T/2 \approx 100 \cdot 10^{-6}$  с. Поэтому предельная энергия, которую должен рассеять варистор при пробое ЭФ в момент восстановления одного тиристора из цепочки тиристорного высоковольтного ключа для базисного напряжения на накопительном конденсаторе  $U_n = U_0 = 100 \times 10^3$  В и напряжении стабилизации одного варистора  $U_0 = 2000$  В,

$$W = \frac{U_0 I_\phi T}{\pi} \approx 188 \text{ Дж.}$$

Для варисторов ключа первого габарита эта энергия составляет около 55 Дж.

При пробое ЭФ в режиме неполного восстановления тиристорного ключа возможно переключение выключившихся тиристоров по скорости нарастания прямого напряжения ( $du/dt$ ) и коммутации через них тока пробоя ЭФ, что может привести к повреждению полупроводниковой структуры тиристоров. Поэтому несмотря на то, что защитные ограничители способны погасить энергию, выделяемую в них при пробое ЭФ, необходимо предусмотреть защиту, формирующую в случае пробоя дополнительный (следящий) импульс управления тиристорами ключа в режиме их неполного восстановления.

Один из возможных способов защиты тиристоров в таких режимах заключается в том, что контролируется интервал времени тока тиристоров после прохождения обратного тока, соизмеримый со временем восстановления управляющих свойств тиристоров. В случае появления в этом интервале тока прямой полярности вырабатываются импульсы управления на всю последовательную цепочку вентилях [7].

В настоящее время ВНИИпреобразователем по совместным разработкам с ЭНИН им. Г. М. Кржижановского проведена опытно-конструкторская работа по созданию приставок для модернизации системы питания ЭФ газоочистки и перевода их на импульсную систему питания. Техническая документация на приставки импульсного питания передана для их серийного изготовления.

На действующем ЭФ проведены испытания опытного образца приставки импульсного питания<sup>2</sup>. На рис. 6 приведены осциллограммы, полученные при этих испытаниях, и расчетные кривые, построенные применительно к параметрам испытуемых ЭФ и приставок. Совпадение экспериментальных и расчетных данных достаточно хорошее, что свидетельствует о правильности выбора математической модели, описывающей электромагнитные процессы в ЭФ.

Расхождение экспериментальных и расчетных данных можно объяснить тем, что в расчетах не учитывались нелинейный характер емкости ЭФ и эффект вытеснения тока в обмотках индуктивностей при импульсных токах,

<sup>1</sup> Электрофильтр питается выпрямленным напряжением отрицательной полярности. Однако для удобства анализа поведения токов и напряжений в схеме расчеты и иллюстрации выполнены для случая питания ЭФ напряжением положительной полярности.

<sup>2</sup> В испытаниях принимали участие Нагорный В. В. и Шварц Э. Л.

что привело к увеличению активных сопротивлений обмоток.

По результатам исследований и испытаний в аварийных режимах приставок для ИИП электрофильтров можно сделать следующие основные выводы, которые необходимо учитывать при модернизации их системы питания:

1) для ограничения до допустимых пределов тока через диоды выпрямительного моста при пробое в нагрузке (ЭФ) необходимо увеличить значение индуктивности  $L_3$ , учитывая при этом, что увеличение этой индуктивности не влияет на процессы заряда накопительного конденсатора и формирования импульсного напряжения;

2) существует реальная возможность снижения установленной мощности и значения высокого напряжения, а следовательно, и массы, и габаритов питающего трансформатора;

3) необходимо предусматривать защиту тиристоров в режиме их полного восстановления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 742899 (СССР). Устройство для питания электрофильтров / И. П. Башкатов, Б. И. Гринштейн, В. П. Жмуров, В. В. Нагорный, З. Л. Шварц. Оpubл. в Б. И., 1980, № 23.
2. Шварц З. Л., Мирзабекян Г. З. Исследования импульсной системы питания промышленных электрофильтров. — Электричество, 1980, № 2.
3. Система питания электрофильтров и особенности процессов осаждения в поле импульсной короны / З. Л. Шварц, Г. З. Мирзабекян, В. В. Нагорный, Б. И. Гринштейн. — Электричество, 1983, № 8.
4. Применение импульсного напряжения для питания электрофильтров, улавливающих высокоомную пыль / З. Л. Шварц, В. В. Нагорный, Е. Л. Бурyleва, А. Д. Гонозов — Электричество, 1978, № 4.
5. Такеути Т. Теория и применение вентильных цепей для регулирования двигателя. — Л.: Энергия, 1973.
6. Тимошенко А. Л., Толстов Ю. Г. Устройства защиты высоковольтных тиристорных вентилях от перенапряжений на основе оксидно-цинковых варисторов. — Техническая электродинамика, 1982, № 5.
7. А. с. 773892 (СССР). Устройство для управления тиристорами высоковольтного вентиля / И. П. Башкатов, С. Л. Безуглый, Б. И. Гринштейн, В. П. Жмуров. Оpubл. в Б. И., 1980, № 3.

[04.11.86]



УДК 621.311.018.782.3.001.24:681.142-523.8

## Расчет переходных процессов в автономных электроэнергетических системах

КОСЬКИН Ю. П., СМЕРНОВА Н. Н.

**Введение.** Математическому моделированию и исследованию переходных процессов в автономных электроэнергетических системах (АЭЭС) придается большое значение (например, [1—4]). Однако, несмотря на серьезные достижения в этой области, ряд задач требует поиска новых решений, учитывающих возможности вычислительной техники и усложнение структур АЭЭС. Применение преобразованных уравнений электрических машин (в координатах  $d, q, 0$ ) заставляет использовать допущения, позволяющие получить, как правило, только частные решения, связанные с конкретными расчетными схемами. В результате алгоритмы лишаются общности, а области их использования являются ограниченными.

Другим недостатком записи дифференциальных уравнений электрических машин в форме, аналогичной уравнениям Парка — Горева, является сложность формирования уравнений связи между элементами АЭЭС, что, как правило, приводит к эквивалентированию схемы распределения и нагрузки, а в ряде случаев — и источников электроэнергии. Очевидно поэтому в опубликованных работах рассматриваются АЭЭС относительно простой структуры (например, [3]) или при исследовании многомашинной системы применяются уравнения связи сложной формы [2].

В данной статье решается задача построения общего алгоритма и создания программного комплекса для исследования переходных процессов в АЭЭС любой структуры (рис. 1). В качестве исходных используются не преобразованные в собственных координатах  $A, B, C$  дифференциальные уравнения электрических машин, решаемые при обычных допущениях [5]: не учитываются явления гистерезиса и потери в стали, распределение

намагничивающих сил и магнитных потоков в машинах считается синусоидальным.

1. **Математическая модель АЭЭС.** В соответствии с [1] рассмотрим модель АЭЭС, включающую уравнения синхронных (СМ) и асинхронных (АМ) машин, первичных двигателей синхронных генераторов (СГ) и механизмов, приводимых асинхронными двигателями (АД), статической нагрузки, систем автоматического регулирования, соединительных линий и уравнения связи.

1.1. Дифференциальные уравнения электромагнитных переходных процессов СМ и АД, разрешенные относительно производных искомых токов статорных и роторных контуров, запишем в матричной форме:

$$\frac{d}{dt} \bar{i} = [L]^{-1} \left( [u] - \left( [r] + \omega \frac{d}{d\gamma} \right) L \right) \bar{i}. \quad (1)$$

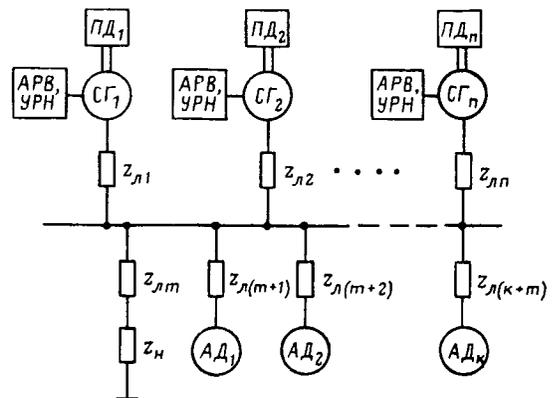


Рис. 1. Структурная схема АЭЭС

Обозначения и матрицы в (1) и далее, кроме специально оговоренных, соответствуют [5].

Элементы матриц индуктивностей  $[L]$  являются тригонометрическими функциями угла  $\gamma$  между соответствующими осями статоров и роторов СМ и АМ. Это обуславливает необходимость решения (1) как дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, что требует больших затрат машинного времени, и, кроме того, точность их решения значительно снижается с увеличением времени переходного процесса. Разработанные во Львовском политехническом институте методы решения таких уравнений [6] позволяют сократить затраты машинного времени, однако их применение требует большого объема оперативной памяти ЭВМ. По этой причине они не используются для расчета переходных процессов в АЭС сложной структуры, включающих большое число электрических машин.

В данной статье предлагается новый, апробированный в ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина) алгоритм численного решения уравнений (1), основанный на том, что элементы обратных матриц индуктивностей  $[L]^{-1}$  как СМ, так и АД [7] являются периодическими тригонометрическими функциями угла  $\gamma$  (доказательство приведено в приложении).

В результате при решении (1) матрица  $[L]$  СМ обращается только для значений  $\gamma=0, 45^\circ$  и  $90^\circ$ , т. е. три раза, а для АД — один раз.

Предлагаемый подход к решению (1) может быть использован для электрических машин как с ненасыщенной, так и с насыщенной магнитными цепями. В последнем случае элементы обратных матриц индуктивностей являются также функциями токов статора и ротора и поэтому должны заново рассчитываться внутри каждого интервала интегрирования.

1.2. Уравнения нагрузки, разрешенные относительно производных токов, используются в виде

$$\frac{d}{dt} \bar{i}_n = [L_n]^{-1} (\bar{u}_n - [r_n] \bar{i}_n). \quad (2)$$

1.3. Электромеханические переходные процессы в генераторных агрегатах и асинхронных приводах АЭС учитываем с помощью уравнений равновесия моментов для СГ

$$J \frac{d^2 \gamma}{dt^2} = M_B - M + \Delta M; \quad (3)$$

для АД

$$J \frac{d^2 \gamma}{dt^2} = M - M_B, \quad (4)$$

где  $J$  — момент инерции;  $M_B$  — механический момент (момент приводного двигателя СГ или момент сопротивления механизма АД);  $M = \frac{1}{2} \bar{i}_t \frac{d[L]}{d\gamma} \bar{i}_t$  — электромагнитный момент;  $\Delta M$  — дополнительный момент, учитывающий действие устройства автоматического распределения нагрузки (УРН).

Механический момент турбины с регулятором частоты вращения определяется из уравнений [8]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM_B}{dt} &= -\frac{1}{T_c} \sigma; \\ \frac{d\sigma}{dt} &= \frac{1}{T_s} [K_s(\omega - 1) + M_B - \sigma]; \\ M_{B\min} &\leq M_B \leq M_{B\max}, \end{aligned} \right\} (5)$$

где  $T_c$  — постоянная времени сервоусилителя;  $\sigma$  — относительное перемещение поршня сервоусилителя;  $T_s$  — постоянная времени золотника.

Уравнения равновесия для дизеля прямого действия с катарактом используется в виде

$$\left. \begin{aligned} T_r \frac{d^2 M_B}{dt^2} + T_k \frac{dM_B}{dt} + \sigma M_B + \delta_l (M_B - \varphi) + (\omega - 1) &= 0; \\ T_l \frac{d\varphi}{dt} + \varphi &= M_B; \\ M_{B\min} &\leq M_B \leq M_{B\max}, \end{aligned} \right\} (6)$$

где  $T_l$ ,  $\varphi$  — постоянная времени и перемещение катаракта регулятора скорости вращения;  $T_k$  — постоянная времени вязкого трения регулятора;  $T_r$  — постоянная времени чувствительного элемента регулятора;  $\delta_l$  — дополнительный статизм регулятора.

В соответствии с [1]:

$$\Delta M = k\mu_s, \quad (7)$$

где  $k$  — коэффициент усиления механизма изменения уставки по частоте вращения первичных двигателей;  $\mu_s$  — относительное значение координаты, определяющей уставку по скорости, которое определяется из решения уравнения

$$T_s \frac{d^2 \mu_s}{dt^2} + \frac{d\mu_s}{dt} = -k_s \Delta P, \quad (8)$$

где  $T_s$  — постоянная времени УРН;  $k_s$  — коэффициент усиления УРН;  $\Delta P$  — разность активных мощностей генераторов.

Момент сопротивления, создаваемый механизмом на валу АД, учитываем в виде

$$M_B = K_s (m_0 + m_d \omega^\alpha), \quad (9)$$

где коэффициенты  $K_s$ ,  $m_d$ ,  $m_0$ ,  $\alpha$  выбираются в зависимости от типа нагрузки с учетом рекомендаций [8].

1.4. Уравнения системы регулирования возбуждения СГ для случая амплитудно-фазового компаундирования с корректором напряжения вводим в модель в виде [8]:

$$\left. \begin{aligned} u_f &= r_f i_f + \Delta u_f; \\ 0 &\leq u_f \leq u_{f\max}; \\ \frac{d\Delta u_f}{dt} &= \frac{1}{T_k} [K_k (1 - u) - \Delta u_f]; \\ \Delta u_{f\min} &\leq \Delta u_f \leq \Delta u_{f\max}, \end{aligned} \right\} (10)$$

где  $K_k$ ,  $T_k$  — коэффициент усиления и постоянная времени цепи корректора.

1.5. Для получения уравнений связи представляем АЭС в виде многоконтурной системы с соединениями, осуществляемыми посредством активных сопротивлений, значения которых выбираются достаточно большими, чтобы их шунтирующим действием можно было пренебречь (рис. 2).

Решая получаемые при этом уравнения равновесия напряжений для любого  $i$ -го элемента АЭС, получаем:

$$\bar{u}_i = [R] \bar{i}_\Sigma + [R_0] \bar{i}_i, \quad (11)$$

где  $\bar{u}_i$  — вектор-столбец фазных напряжений  $i$ -го элемента системы;  $[R]$  — диагональная матрица активных сопротивлений связи;  $\bar{i}_\Sigma$  — вектор-столбец суммы фазных токов всех элементов АЭС;  $[R_0]$  — диагональная

матрица активных сопротивлений нейтрали или нулевого провода;  $i_i$  — вектор-столбец суммы фазных токов  $i$ -го элемента системы.

При изменении структуры АЭС в уравнениях связи (11) меняется только матрица  $\bar{I}_2$ .

Уравнения (1) — (11) образуют математическую модель АЭС, позволяющую исследовать электромагнитные и электромеханические, симметричные и несимметричные процессы в сложных системах переменного тока. Применительно к ней разработан программный комплекс, позволяющий использовать два метода численного интегрирования — классический и системный.

В качестве классического используется наиболее часто применяемый метод Рунге — Кутта 4-го порядка со стандартной программой DRKGS двойной точности [9]. Для повышения производительности численных исследований исходная программа дополнена специально разработанным блоком оптимизации шага интегрирования [10]. В нем шаг меняется в ходе интегрирования в зависимости от заданной точности решения.

В качестве системного используется метод ломаных [11], обеспечивающий сокращение времени счета, но требующий большого объема памяти ЭВМ.

2. Программный комплекс включает алгоритм и программы расчета переходных процессов в основных типах оборудования АЭС: в генераторных агрегатах, в асинхронных и синхронных двигателях, в нагрузке. Программы написаны на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV и предназначены для реализации на ЕС ЭВМ в операционной системе ОС.

Укрупненная блок-схема расчета переходных процессов по уравнениям (1) — (11) представлена на рис. 3.

В блоке 1 задаются сведения о структуре АЭС, количестве СГ, типе первичных двигателей генераторов, количестве АД, статической нагрузке, а также вводятся массивы параметров всех элементов АЭС.

Блок 2 предназначен для вывода на печать сведений о структуре и параметрах элементов АЭС.

Блок 3 служит для задания расчетного режима (режимы к. з., включение или выключение нагрузки, включение СГ на параллельную работу и т. д.)

Блок 4 служит для расчета начальных условий (начальных значений токов, частоты, моментов и т. д. для элементов АЭС) в зависимости от заданного расчетного режима. Здесь же осуществляется обращение к подпрограмме, реализующей численный метод интегрирования систем нелинейных дифференциальных уравнений.

При интегрировании (блок 5) происходит многократное обращение к подпрограммам расчета правых частей дифференциальных уравнений элементов АЭС (блоки 7, 13, 14, 15). При этом они обрабатываются столько раз, сколько элементов данного типа представлено на структурной схеме системы. Вход в блок 5 осуществляется в процессе счета через заданные интервалы времени с новым, оптимальным шагом интегрирования. Этот шаг выбирается в блоке 8 в зависимости от заданной точности решения.

Полученные в результате расчета в блоках 7 и 13 значения токов электрических машин используются в блоке 9 для вычисления насыщенных значений элементов матриц индуктивностей.

В блоке 6 происходит расчет обратных матриц индуктивностей электрических машин.

В блоке 10 осуществляется вывод на печать интересующей информации в удобном для пользователя виде (таблично или графически).

В блоке 11 в соответствии с заданным временем расчета переходных процессов происходит остановка решения или, при необходимости, запись на магнитную ленту данных о новом состоянии системы.

3. Пример. Рассмотрим переходные процессы в АЭС, включающей два одинаковых турбогенератора типа ТК2-2, четыре АД типа АМ 112-2 и статическую нагрузку. Параметры СГ и АД взяты из [8]. Статическая нагрузка составляет 40 % суммарной мощности генераторов.

Исследуемый режим включает три периода: а) в начальный момент происходит синхронизация СГ; б) пос-

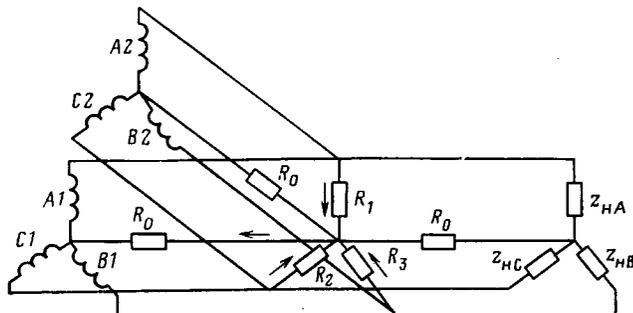


Рис. 2. Развернутая схема автономной электроэнергетической системы

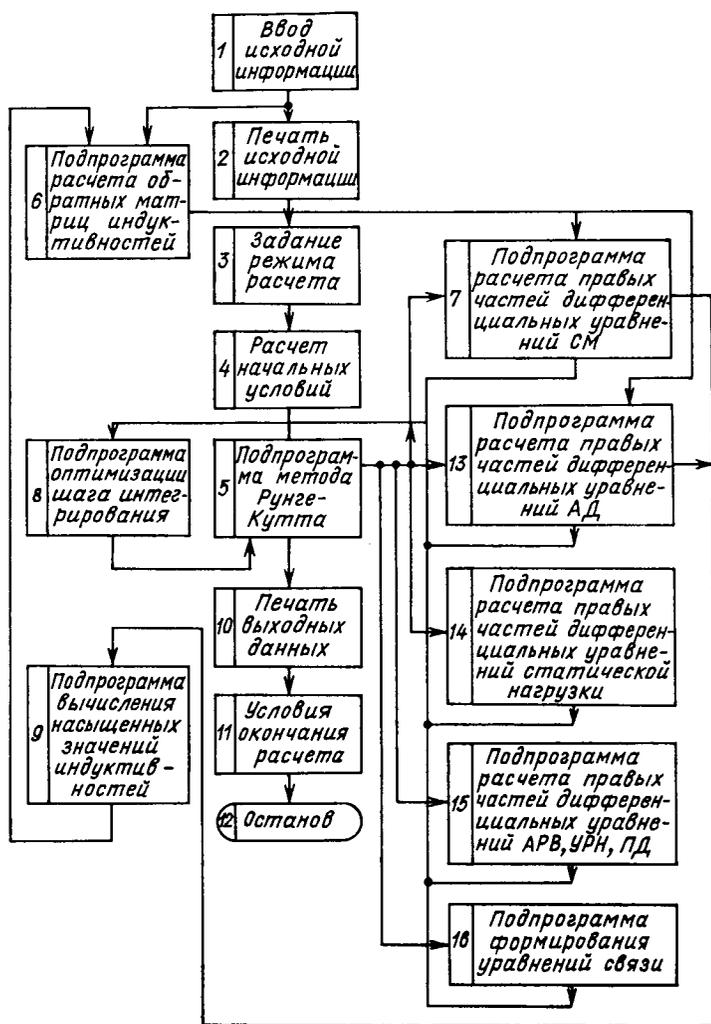


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета переходных процессов

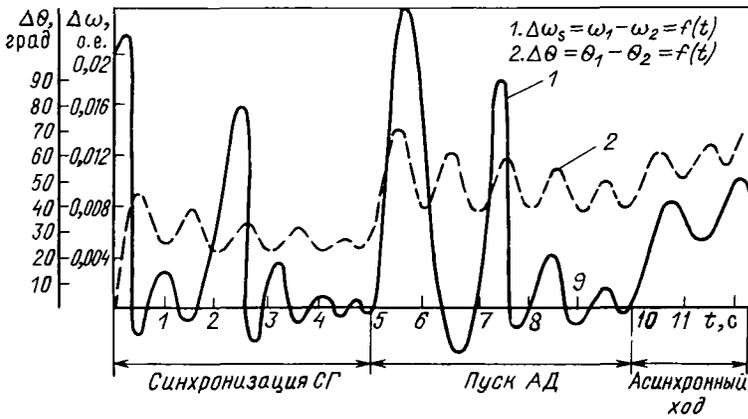


Рис. 4. Изменения параметров режима при переходном процессе

ле втягивания их в синхронизм осуществляется прямой пуск АД; в) через время  $\Delta t$  происходит потеря возбуждения у одного из СГ, что приводит к его асинхронному ходу.

Графики (рис. 4), иллюстрирующие характер изменения разности угловых скоростей вращения  $\Delta\omega_s$  и угла рассогласования  $\Delta\theta$  роторов СГ, показывают, что в режиме асинхронного хода устойчивая работа АЭЭС не обеспечивается.

**Выводы.** 1. Прямые и обратные матрицы индуктивностей трехфазных электрических машин являются периодическими (тригонометрическими) функциями углов поворота ротора. При использовании этого обстоятельства математическое моделирование АЭЭС переменного тока целесообразно осуществлять применяя непроброзованные дифференциальные уравнения.

2. Разработанные в ЛЭТИ на базе непроброзованных уравнений и описанные в данной статье алгоритм и программный комплекс позволяют исследовать АЭЭС любой структуры с существенно меньшими затратами машинного времени, чем в случае применения моделей с преобразованными уравнениями Парка — Горева.

#### Приложение.

Элементы обратных матриц индуктивностей СМ  $[L]^{-1}$ , как и у АД [7], являются постоянными или три-

Обратная матрица  $[L]^{-1}$  может быть представлена в виде [12]:

$$[L]^{-1} = [A]^{-1} = \begin{bmatrix} [B_{11}] & [B_{12}] \\ [B_{22}] & [B_{21}] \end{bmatrix}. \quad (\text{П-3})$$

В соответствии с [7, 12] обратная матрица индуктивностей контуров ротора СМ является постоянной, т. е.  $[L_{p.p}]^{-1} = \text{const}$ , и имеет следующий вид:

$$[B_{22}] = ([A_{22}] - [A_{21}] \cdot [A_{11}]^{-1} \cdot [A_{12}])^{-1}. \quad (\text{П-4})$$

Используя приемы [7, 12], можно получить выражения для обратных матриц индуктивностей фаз статора СМ в виде

$$[B_{11}] = ([A_{11}] - [A_{12}] \cdot [A_{22}]^{-1} \cdot [A_{21}])^{-1}. \quad (\text{П-5})$$

Обратная матрица индуктивностей фаз статора СМ  $[L_{c.c.}]^{-1}$  имеет вид

$$[L_{c.c.}]^{-1} = \begin{bmatrix} C_{0ih} + C_{1ih} \times \cos 2(\gamma + 120^\circ) + C_{2ih} \times \sin 2(\gamma + 120^\circ) & C_{0ih} + C_{1ih} \times \cos 2(\gamma - 120^\circ) + C_{2ih} \times \sin 2(\gamma - 120^\circ) & C_{0ih} + C_{1ih} \times \cos 2\gamma + C_{2ih} \sin 2\gamma \\ C_{0ih} + C_{1ih} \times \cos 2(\gamma - 120^\circ) + C_{2ih} \times \sin 2(\gamma - 120^\circ) & C_{0ih} + C_{1ih} \times \cos 2\gamma + C_{2ih} \times \sin 2\gamma & C_{0ih} + C_{1ih} \times \cos 2(\gamma + 120^\circ) + C_{2ih} \times \sin 2(\gamma + 120^\circ) \\ C_{0ih} + C_{1ih} \times \cos 2\gamma + C_{2ih} \times \sin 2\gamma & C_{0ih} + C_{1ih} \times \cos 2(\gamma + 120^\circ) + C_{2ih} \times \sin 2(\gamma + 120^\circ) & C_{0ih} + C_{1ih} \times \cos 2(\gamma - 120^\circ) + C_{2ih} \times \sin 2(\gamma - 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (\text{П-6})$$

где

$$C_{0ih} = \frac{1}{2} (M_{ik}^{-1} |_{\gamma=0} + M_{ik}^{-1} |_{\gamma=90^\circ});$$

$$C_{1ih} = \frac{1}{2} (M_{ik}^{-1} |_{\gamma=0} - M_{ik}^{-1} |_{\gamma=90^\circ});$$

$$C_{2ih} = M_{ik}^{-1} |_{\gamma=45^\circ} - C_{0ih}.$$

Обратная матрица взаимных индуктивностей фаз статора и контуров ротора имеет вид

$$[M_{c.p.}]^{-1} = [M_{p.c.}]^{-1} =$$

$$= \begin{bmatrix} M_{Af}^{-1} |_{\gamma=0} \cos \gamma + M_{Af}^{-1} |_{\gamma=90^\circ} \sin \gamma & M_{Ag}^{-1} |_{\gamma=0} \cos \gamma + M_{Ag}^{-1} |_{\gamma=90^\circ} \sin \gamma & M_{Ah}^{-1} |_{\gamma=0} \cos \gamma + M_{Ah}^{-1} |_{\gamma=90^\circ} \sin \gamma \\ M_{Af}^{-1} |_{\gamma=0} \cos(\gamma - 120^\circ) + M_{Af}^{-1} |_{\gamma=90^\circ} \sin(\gamma - 120^\circ) & M_{Ag}^{-1} |_{\gamma=0} \cos(\gamma - 120^\circ) + M_{Ag}^{-1} |_{\gamma=90^\circ} \sin(\gamma - 120^\circ) & M_{Ah}^{-1} |_{\gamma=0} \cos(\gamma - 120^\circ) + M_{Ah}^{-1} |_{\gamma=90^\circ} \sin(\gamma - 120^\circ) \\ M_{Af}^{-1} |_{\gamma=0} \cos(\gamma + 120^\circ) + M_{Af}^{-1} |_{\gamma=90^\circ} \sin(\gamma + 120^\circ) & M_{Ag}^{-1} |_{\gamma=0} \cos(\gamma + 120^\circ) + M_{Ag}^{-1} |_{\gamma=90^\circ} \sin(\gamma + 120^\circ) & M_{Ah}^{-1} |_{\gamma=0} \cos(\gamma + 120^\circ) + M_{Ah}^{-1} |_{\gamma=90^\circ} \sin(\gamma + 120^\circ) \end{bmatrix}. \quad (\text{П-7})$$

гонометрическими функциями угла  $\gamma$

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_{c.c.}] & [M_{c.p.}] \\ [M_{p.c.}] & [L_{p.p.}] \end{bmatrix} = [A]. \quad (\text{П-1})$$

В случае СМ прямая матрица индуктивностей имеет вид [5]:

$$[A] = \begin{bmatrix} [A_{11}] & [A_{12}] \\ [A_{21}] & [A_{22}] \end{bmatrix}. \quad (\text{П-2})$$

Из уравнений (П-6) и (П-7) следует, что матрицы  $[L_{c.c.}]^{-1}$  и  $[M_{c.p.}]^{-1} = [M_{p.c.}]^{-1}$  являются тригонометрическими функциями угла  $\gamma$ , так же как это было установлено для АД [7].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веретенников Л. П. Исследование процессов в судовых электроэнергетических системах. Теория и методы. — Л.: Судостроение, 1975.

2. Кетнер К. К., Козлова И. А., Сендюров В. М. Алгоритмизация расчетов переходных процессов автономных электроэнергетических систем. — Рига: Зинатне, 1981.

3. Веретенников Л. П., Яковлев В. П. К расчету переходных процессов в автономных электроэнергетических системах на ЦВМ. — Электричество, 1969, № 5.

4. Ковалев Ю. З., Тамоян Г. С., Ощепков В. А. Построение канонических методов исследования динамики электрических машин. — Тр. МЭИ, 1981, вып. 538.

5. Страхов С. В. Переходные процессы в электрических цепях, содержащих машины переменного тока. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1960.

6. Чабан В. И. Единая математическая модель синхронной и асинхронной машин как элементов системы. — Изв. вузов. Электромеханика, 1984, № 3.

7. Соломахин Д. В., Вальясе Р. К., Бессмертных Н. А. Обратная матрица индуктивностей асинхронной машины в фазной системе координат. — Тр./МЭИ, 1980, вып. 449.

8. Справочник судового электротехника, т. 1, 2. — Л.: Судостроение, 1980.

9. Пакет научных подпрограмм на языке ФОРТРАН-IV. — Минск: Изд. ин-та математики АН БССР, 1977.

10. Севрюгин И. К., Смирнова Н. Н. Повышение эффективности алгоритма расчета сложных переходных процессов синхронной машины с ненасыщенным магнитопроводом. — Деп. в Информэлектро 10.09.85, № 27 ЭТ.

11. Севрюгин И. К., Смирнова Н. Н. Алгоритм расчета переходных процессов синхронных и асинхронных машин. — В кн.: Тез. докл. Краевой науч.-техн. конф. по автоматизации электроприводов и оптимизации режимов электропотребления. Красноярск, 1985.

12. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. — М.: Наука, 1966.

[30.06.86]



УДК 621.316.925.45.001.3

## Синтез измерительных органов защиты как градиентной самонастраивающейся системы

БАХМАНН У., ВАНИН В. К., ГИНОВКЕР А. М., ПАВЛОВ Г. М., ПЕЧКОВСКИЙ А. В.

Работа устройств релейной защиты может рассматриваться как контроль технического состояния объектов с целью своевременного обнаружения повреждений и выявления неформальных режимов.

Сокращение времени, отводимого на контроль, с одной стороны, и увеличение длительности переходных процессов в защищаемых объектах, в частности в ЛЭП, с другой стороны, приводит к тому, что во время контроля объект еще находится в переходном режиме. Следовательно, система контроля должна выдать информацию о состоянии объекта на основании измерения нестационарных сигналов. Это задача динамического контроля.

Современные защиты оборудования от повреждений контролируют в основном интегральные значения (действующие, средние) электрических величин. Поэтому их уставки срабатывания соответствуют, как правило, установившимся процессам короткого замыкания (к. з.), а сам принцип контроля может быть отнесен к статическому, когда переходный процесс в объекте заканчивается за время, меньшее времени, отводимого для контроля. По этой причине существующие устройства статического контроля характеризуются значительными погрешностями в динамике и, как следствие, низкой достоверностью контроля. Увеличение достоверности контроля за счет широко применяемых частотных фильтров также связано со стационарным подходом к решению задачи.

Отметим, что применительно к релейной защите повышенная достоверность контроля необходима именно в те моменты, когда в наибольшей степени проявляется нестационарность входных сигналов. Следовательно, существует явное противоречие между свойствами входной информации и принятым в большинстве практических случаев характером ее обработки.

Для устранения указанного противоречия целесообразно построение устройств релейной защиты в ряде случаев как систем динамического контроля, что обеспечивает повышение достоверности контроля. Кроме то-

го, такой подход позволяет увеличить быстродействие и расширить фундаментальные возможности устройств релейной защиты.

Сказанное выше в полной мере применимо к дистанционной защите, обладающей рядом известных преимуществ и основанной на контроле параметров объекта. В настоящее время в большинстве практических случаев осуществляется упрощенный контроль по полному сопротивлению для сигналов промышленной частоты. Однако возможности дистанционного принципа значительно шире, особенно при использовании его для динамического контроля, чему и посвящается дальнейший материал статьи.

В ряде работ [1—4] предлагалось отказаться от статического подхода к решению задачи частотной фильтрации входных сигналов и учитывать динамические свойства линии. При этом короткозамкнутая линия представляется  $RL$ -схемой замещения или в виде  $\Pi$ -образной ячейки, режим которой описывается обыкновенным дифференциальным уравнением вида

$$LC \frac{d^2 u}{dt^2} + RC \frac{du}{dt} + u = L \frac{di}{dt} + Ri, \quad (1)$$

где  $u$ ,  $i$  — напряжение и ток линии в месте установки защиты;  $R$ ,  $L$ ,  $C$  — активное сопротивление, индуктивность и емкость замещаемого участка линии, которые можно выразить через удельные параметры линии  $R_0$ ,  $L_0$ ,  $C_0$ , как  $R = R_0 l$ ,  $L = L_0 l$ ,  $C = C_0 l$ ;  $l$  — длина замещаемого участка.

При фиксированных значениях параметров  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , соответствующих длине защищаемой зоны и установленных в схеме дистанционного измерительного органа, выполненного на элементах аналоговой вычислительной техники [1], дифференциальное уравнение (1) может быть решено относительно одной из электрических величин  $u$  или  $i$  при известной второй величине. На основании этого делается вывод о месте нахождения к. з. Однако достоверный результат при высоком быстродействии обеспечивается только при к. з. на границе за-

щищаемой зоны или в случае коротких линий, когда они могут быть представлены  $RL$ -схемами замещения.

Динамические свойства объекта учитываются также при нестационарном решении задачи фильтрации токов и напряжений, основанном на использовании фильтров Калмана — Бьюси [4]. Основу фильтра составляет  $RL$ -схема замещения линии. Подбор коэффициентов фильтра должен осуществляться на основе полного знания статистических характеристик полезного сигнала и помех. Учитывая значительные трудности получения этих характеристик, авторы [4] приближенно рассчитывают их путем математического моделирования.

Возможен другой путь выполнения измерительных органов, основанный на решении уравнения (1) или подобного ему обыкновенного дифференциального уравнения относительно коэффициентов, в качестве которых могут быть использованы  $R$ ,  $L$ ,  $C$  или  $l$ . При этом ток и напряжение на входе защиты и их производные являются известными функциями времени, содержащими свободные апериодические и гармонические составляющие, а знание их статистических характеристик не требуется.

Так, в [2] на основании уравнения вида (1) посредством ЦВМ определяется расстояние  $l$  до места повреждения, однако полученная одномерная характеристика срабатывания малоинформативна.

Алгоритм [3], ориентированный на использование микропроцессоров, позволяет определить параметры  $R$  и  $L$  уравнения (1) и тем самым дает логической части защиты больше информации о состоянии электропередачи.

В обоих алгоритмах [2, 3] фактически решаются алгебраические уравнения, полученные из (1) для различных фиксированных моментов времени. При этом производится значительный объем вычислений. Вследствие существующих погрешностей представления линии уравнением (1) и погрешностей входной информации и вычислений определяемые значения параметров не будут оставаться постоянными, и требуется их дополнительная обработка.

Следует отметить, что указанный способ достаточно просто реализуется и в аналоговом виде. Так, на рис. 1 приведена схема (сплошные линии), описывающая автоматическое решение уравнения (1) относительно его параметров при неучете емкостной проводимости. В основу синтеза структурной схемы положена следующая система уравнений, вытекающая из условия неизменности параметров во времени:

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di}{dt} + Ri - u &= \frac{dR}{dt}; \\ L \frac{di}{dt} + Ri - u &= \frac{dL}{dt}. \end{aligned} \right\} (2)$$

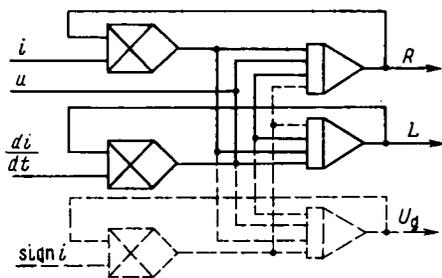


Рис. 1

Для учета влияния дуги в месте возникновения к. з. следует воспользоваться известным предположением, что напряжение дуги постоянно в течение большой части полупериода, т. е. оно может быть аппроксимировано прямоугольной функцией вида  $u_d = |U_d| \times \text{sign } i(t)$ ; тогда исходная система уравнений, аналогичная (2), приобретает вид

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di}{dt} + Ri + u_d - u &= \frac{dR}{dt}; \\ L \frac{di}{dt} + Ri + u_d - u &= \frac{dL}{dt}; \\ L \frac{di}{dt} + Ri + u_d - u &= \frac{dU_d}{dt}; \\ u_d &= |U_d| \text{sign } i, \end{aligned} \right\} (3)$$

а ее решение осуществляется по схеме, показанной на рис. 1 (включая часть, изображенную пунктиром).

При конкретном применении этой схемы необходимо учитывать реальное направление перетока мощности (например, с помощью пусковых органов) и избегать фиксации параметров в окрестности точки перехода тока через нуль.

Рассмотренные алгоритмы имеют недостаток, связанный с тем обстоятельством, что система алгебраических уравнений некорректна в случае изменения контролируемых параметров во времени. В связи с этим и с учетом погрешностей моделирования и измерения может потребоваться, как уже указывалось, дополнительная обработка результатов измерения.

Задача идентификации динамических систем в общем случае при оценивании параметров [5—7] формулируется следующим образом. По результатам наблюдений над входными и выходными переменными объекта должна быть построена оптимальная с точки зрения избранного критерия модель, т. е. получено формализованное представление этого объекта. Другими словами, должны быть определены структура и параметры математической модели, обеспечивающие наилучшее совпадение выходных координат модели и объекта при одинаковых входных воздействиях.

В процедуре идентификации можно выделить следующие этапы.

1. Выбор структуры модели на основании имеющейся априорной информации об исследуемом процессе. Применительно к дистанционной защите эта структура определяется выбранной схемой замещения электропередачи и описывающим ее уравнением.

2. Выбор критерия близости объекта и модели с учетом специфики задачи. В рассматриваемом случае выбранный критерий должен обеспечить приемлемые быстроедействие и точность процесса идентификации.

3. Определение параметров модели, оптимальных с точки зрения выбранного критерия близости. Этими параметрами могут служить коэффициенты дифференциального уравнения, описывающего принятую математическую модель, или непосредственно параметры схемы замещения  $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $l$ .

Первые два этапа осуществляются на стадии проектирования устройств. Таким образом, при известной схеме замещения электропередачи, математическая модель которой реализована в измерительном органе, работа последнего сводится к оцениванию параметров в реальном времени.

Построение измерительного органа может быть про-

ведено различными методами идентификации параметров динамических объектов. Так, известны явные и неявные, поисковые и беспоисковые методы, а также различные способы построения моделей и выбора критерия близости.

Для построения дистанционного измерительного органа целесообразно использование беспоисковой самонастраивающейся системы. В этом случае, как известно, применение для целей идентификации входных сигналов объекта (напряжений) позволяет избежать влияния помех, которые складываются с полезным сигналом на входе модели и объекта.

При выбранной структуре модели и критерии близости задача идентификации сводится к задаче нахождения экстремума функции нескольких переменных. Для этой цели используются различные методы нахождения экстремума, в частности градиентный метод.

Применение градиентного метода позволяет свести поиск экстремума к решению обыкновенных дифференциальных уравнений спуска, что облегчает использование элементов аналоговой вычислительной техники при реализации измерительного органа. Использование этих элементов создает преимущества при создании измерительных систем, работающих с аналоговыми входными и выходными сигналами в реальном времени. Следует отметить, что этот метод с успехом реализуется и в цифровых устройствах.

В качестве минимизируемого функционала  $E(X)$  примем половину квадрата мгновенной входной ошибки  $\epsilon$ , представляющей собой рассогласование координат объекта и модели,  $E = \epsilon^2/2$ . Тогда скорость убывания функционала в векторной форме записи [6—8] можно представить в виде

$$\frac{dE}{dt} = \left( \text{grad} \frac{\epsilon^2}{2} \right) \left( \frac{dX}{dt} \right),$$

а дифференциальные уравнения наискорейшего спуска — в виде

$$\frac{dX_j}{dt} = -\rho_j \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j}; \quad X_j(0) = X_{j0}, \quad (4)$$

или

$$X_j = -\rho_j \int \epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j} dt + X_{j0},$$

где  $X_j$  — оцениваемые параметры, например, активное сопротивление, индуктивность и емкость согласно принятой схеме замещения или коэффициенты дифференциального уравнения;  $\rho_j$  — коэффициенты пропорциональности компонентов векторов;  $X_j(0)$  — начальные условия.

Уравнения (4) определяют структурную схему контуров самонастройки измерительного органа. Для получения частных производных  $\partial \epsilon / \partial X_j$  известен ряд методов: использование уравнений чувствительности, двух моделей, модели с возмущаемым параметром и др.

Выберем метод использования уравнений чувствительности. При этом структурная схема должна содержать блоки для их решения, так называемые модели чувствительности.

Рассмотрим измерительный орган, в котором математической моделью линии служит уравнение (1), а контуры самонастройки построены по уравнениям (4).

Структурная схема, приведенная на рис. 2, содержит: настраиваемую модель электропередачи 1, блок сравнения 2, блок самонастройки 3, содержащий модели чув-

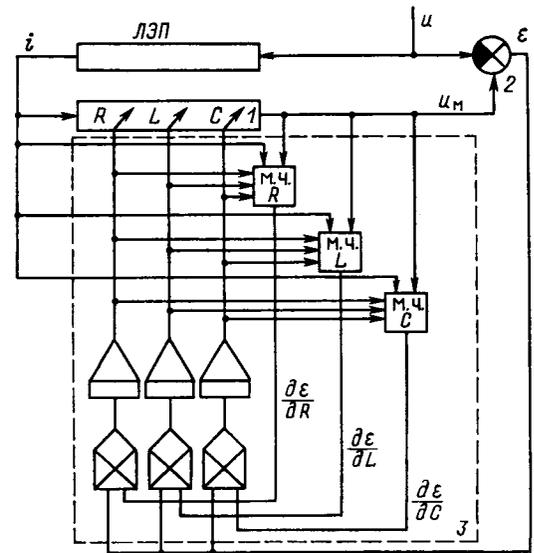


Рис. 2

ствительности, перемножители сигналов, интеграторы. Настраиваемая модель описывается уравнением (1), которое с учетом того, что рассматривается входная ошибка, т. е. используется обратная модель объекта, а входной величиной является ток  $i$ , целесообразно записать в виде

$$L_M C_M \frac{d^2 u_M}{dt^2} + R_M C_M \frac{du_M}{dt} + u_M = L_M \frac{di}{dt} + R_M i, \quad (5)$$

где  $R_M, L_M, C_M$  — настраиваемые параметры модели;  $u_M$  — выходное напряжение модели.

На выходе блока сравнения формируется сигнал ошибки:

$$\epsilon = u_M - u. \quad (6)$$

Для определения функций чувствительности перепишем уравнение (5) в виде

$$\frac{d^2 u_M}{dt^2} + \frac{R_M}{L_M} \frac{du_M}{dt} + \frac{1}{L_M C_M} u_M = \frac{1}{C_M} \frac{di}{dt} + \frac{R_M}{L_M C_M} i. \quad (7)$$

Для получения, например, функции чувствительности по параметру  $R_M$  дифференцируем (7) по  $R_M$  и, поскольку величина  $i$  от параметров модели не зависит, имеем

$$\begin{aligned} \frac{d^2 u_M}{\partial R_M dt^2} + \frac{1}{L_M} \frac{du_M}{dt} + \frac{R_M}{L_M} \frac{\partial^2 u_M}{\partial R_M dt} + \frac{1}{L_M C_M} \frac{\partial u_M}{\partial R_M} &= \\ &= \frac{1}{L_M C_M} i. \end{aligned}$$

Обозначим  $\partial u_M / \partial R_M = r$ ; тогда, заменив частные производные полными, получим уравнение чувствительности по  $R_M$ :

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{R_M}{L_M} \frac{dr}{dt} + \frac{1}{L_M C_M} r = \frac{1}{L_M C_M} i - \frac{1}{L_M} \frac{du_M}{dt}. \quad (8)$$

Аналогично определяются уравнения чувствительности по остальным настраиваемым параметрам.

Модели ЛЭП и модели чувствительности, реализующие решение дифференциальных уравнений второго порядка, строятся известными методами. В случае применения модели объекта, приводящей к ошибке, линейно зависящей от параметров, возможно получение функций чувствительности непосредственно из модели объекта, что упрощает структурную схему [6].

Устойчивость решений дифференциальных уравнений спуска устанавливается на основе второго метода Ляпунова и обеспечивается при выполнении неравенства  $dV/dt \leq 0$ , где  $V$  — так называемая функция Ляпунова, в качестве которой принимается минимизируемый функционал  $E(X)$ . Выполнение этого условия зависит от формы поверхности, описываемой функционалом ошибки в пространстве оцениваемых параметров, и скорости ее изменения. Для рассматриваемой задачи всегда имеет место отрицательная скорость изменения функционала вдоль траектории, так как

$$\frac{dE}{dt} = - \sum_{j=1}^n \rho_j \left( \frac{\partial E}{\partial X_j} \right)^2 \leq 0.$$

Однако, кроме этого общего соображения относительно устойчивости измерительного органа, большое влияние на выбор параметров схемы на этапе его проектирования оказывает желаемое качество переходного процесса настройки параметров. Из дифференциальных уравнений спуска видно, что оно в первую очередь определяется правильным выбором  $\rho_j$ , являющихся, по сути, коэффициентами усиления в контурах самонастройки. При этом желаемое качество переходного процесса определяется противоречивыми требованиями. Так, необходимо обеспечить высокое быстродействие защиты, что может быть достигнуто уменьшением времени переходного процесса, и селективность работы, которая, в свою очередь, наиболее просто достигается при его монотонном характере. В первом случае необходимо  $\rho_j$  увеличивать, а во втором — уменьшать.

Учитывая значительную сложность аналитического анализа подобных систем, а также трудности их моделирования, рассмотрим далее упрощенный вариант, где в качестве математической модели линии примем уравнение

$$L_M \frac{di}{dt} + R_M i = u_M,$$

полученное из (5) при неучете емкостной проводимо-

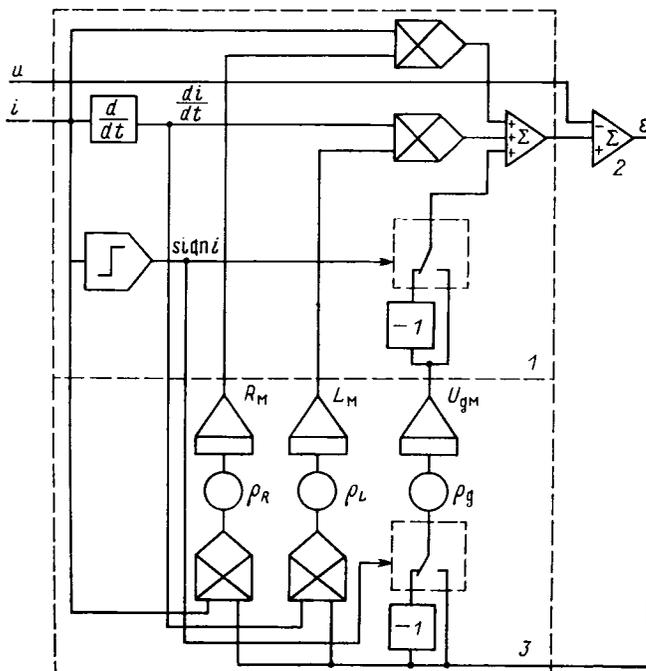


Рис. 3

сти. Такая модель линии является общепринятой для линии незначительной протяженности, имеющих наибольшее распространение. Последнее уравнение с учетом напряжения в дуге имеет вид

$$L_M \frac{di}{dt} + R_M i + u_{д.м} = u_M.$$

Представляя напряжение дуги аппроксимированным выражением  $u_{д.м} = U_{д.м} \text{sign } i$ , получаем

$$L_M \frac{di}{dt} + R_M i + U_{д.м} \text{sign } i = u_M. \quad (9)$$

В случаях повреждений на ЛЭП с двухсторонним питанием такой учет дуги осуществляется с погрешностью, которая для удаленных к. з. ( $l > 100$  км) мала, так как напряжение дуги оценивается [2] равным 4—5 % остаточного напряжения в месте установки защиты. При близких повреждениях погрешность возрастает, что должно учитываться при выборе характеристики срабатывания.

Функции чувствительности по настраиваемым параметрам  $\partial \epsilon / \partial R_M$ ,  $\partial \epsilon / \partial L_M$ ,  $\partial \epsilon / \partial U_{д.м}$  определяются на основании уравнений (6), (9) и соответственно равны  $i$ ,  $di/dt$ ,  $\text{sign } i$ . Отсюда видно, что при использовании модели, приводящей к ошибке, линейно зависящей от параметров, для формирования функций чувствительности не требуются специальные блоки, а уравнения спуска записываются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dR_M}{dt} &= -\rho_R \epsilon i; & R_M(0) &= R_{M0}; \\ \frac{dL_M}{dt} &= -\rho_L \epsilon \frac{di}{dt}; & L_M(0) &= L_{M0}; \\ \frac{dU_{д.м}}{dt} &= -\rho_d \epsilon \text{sign } i; & U_{д.м}(0) &= U_{д.м0}. \end{aligned} \right\} (10)$$

Структурная схема измерительного органа без трансформаторов тока и напряжения и согласующих преобразователей приведена на рис. 3. Она содержит настраиваемую модель ЛЭП 1, блок сравнения 2 и схему самонастройки модели 3, построенную по уравнениям (10). В состав модели по уравнению (9) входят два четырехквadrантных перемножителя, один перемножитель на знак тока, дифференциатор и сумматор. Перемножители одной из величин на знак другой реализуются с помощью нуля-индикатора, переключателей и инвертора. На вход однофазной модели подается разность токов с трансформаторов тока отдельных фаз. Напряжение с выхода модели и междуфазное напряжение тех же фаз с трансформаторов напряжения поступают в схему сравнения мгновенных значений для формирования ошибки.

При направлении мощности от шин в защищаемую линию отслеживаемые параметры  $R$  и  $L$  будут иметь положительный знак, а при обратном направлении — отрицательный, т. е. измерительный орган обладает направленностью действия.

Оценим динамику контуров самонастройки с целью приближенного выбора  $\rho$ . Следует отметить, что точное аналитическое решение задачи при воздействиях произвольного вида неизвестно. Получено, например, решение [7] для подобного типа систем, когда отклонения параметров модели от параметров объекта таковы, что ошибка  $\epsilon$  с достаточной точностью может быть представлена в виде суммы первых членов разложения в ряд Тейлора по текущим отклонениям параметров  $\Delta X_j(t)$ , т. е.

$$\varepsilon(t, X, X_m) = \sum_{j=1}^n \varepsilon_j = \sum_{j=1}^n \Delta X_j(t) \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} \right|_{X_j=X_{jM}}, \quad (11)$$

где  $\Delta X_j(t) = X_{jM}(t) - X_j$ .

Учитывая незначительное влияние дуги на ориентировочный выбор  $\rho$ , рассмотрим решение задачи относительно двух параметров  $\rho$ . Тогда уравнения (10) с учетом (11) записываются в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dR_m(t)}{dt} &= -\rho_R \Delta R(t) i^2 - \rho_R \Delta L(t) \frac{di}{dt} i; \\ \frac{dL_m(t)}{dt} &= -\rho_L \Delta L(t) \left(\frac{di}{dt}\right)^2 - \rho_L \Delta R(t) \frac{di}{dt} i. \end{aligned} \right\} (12)$$

Учитывая, что  $dX_{jM}/dt = d\Delta X_j/dt$ , а время усреднения интеграторами величин на выходах перемножителей меньше времени переходного процесса в контурах самонастройки, получаем следующую систему квазилинейных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Delta R(t)}{dt} + \Delta R(t) Q_{RR} &= -\Delta L(t) Q_{RL}; \\ \frac{d\Delta L(t)}{dt} + \Delta L(t) Q_{LL} &= -\Delta R(t) Q_{LR}, \end{aligned} \right\} (13)$$

где  $Q_{RR} = \rho_R i^2$ ,  $Q_{LL} = \rho_L \left(\frac{di}{dt}\right)^2$ ,  $Q_{RL} = \rho_R \frac{di}{dt} i$ ,  $Q_{LR} = \rho_L \frac{di}{dt} i$  — сигналы на выходе перемножителей.

Полное решение этой системы с учетом начальных условий представляется в виде

$$\left. \begin{aligned} \Delta R(t) &= \left\{ \Delta R(0) \exp\left(\int_0^t Q_{RR} dt\right) + \int_0^t [\Delta L(t) Q_{RL}] \exp\left(\int_0^t Q_{RR} dt\right) dt \right\} \times \\ &\quad \times \exp\left(-\int_0^t Q_{RR} dt\right); \\ \Delta L(t) &= \left\{ \Delta L(0) \exp\left(\int_0^t Q_{LL} dt\right) + \int_0^t [\Delta R(t) Q_{LR}] \exp\left(\int_0^t Q_{LL} dt\right) dt \right\} \times \\ &\quad \times \exp\left(-\int_0^t Q_{LL} dt\right), \end{aligned} \right\} (14)$$

где  $\Delta R(0) \exp\left(-\int_0^t Q_{RR} dt\right)$ ,  $\Delta L(0) \exp\left(-\int_0^t Q_{LL} dt\right)$  — общее решение.

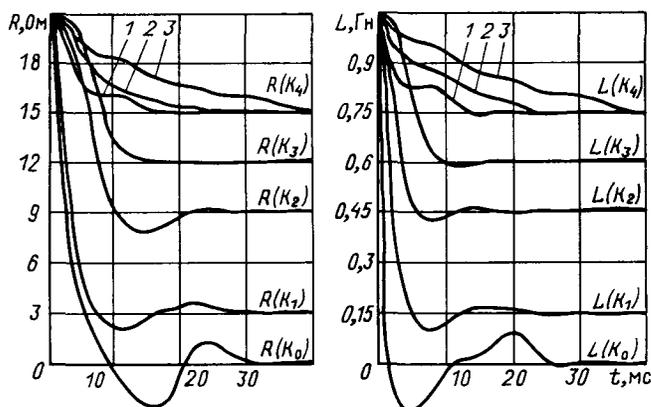


Рис. 4

Полученное решение (14) неудобно для практического применения. Поэтому, используя метод Эйлера, запишем решение следующим образом

$$\left. \begin{aligned} \Delta R(t_m) &= \frac{\Delta R(0) - \sum_{m=0}^{\eta-1} \frac{Q_{RL}(t_m) \Delta L(t_m)}{Q_{RR}(t_m)} [\exp Q_{RR}(t_m) \Delta t_m - 1]}{\prod_{m=0}^{\eta-1} \exp Q_{RR}(t_m) \Delta t_m}; \\ \Delta L(t_m) &= \frac{\Delta L(0) - \sum_{m=0}^{\eta-1} \frac{Q_{LR}(t_m) \Delta R(t_m)}{Q_{LL}(t_m)} [\exp Q_{LL}(t_m) \Delta t_m - 1]}{\prod_{m=0}^{\eta-1} \exp Q_{LL}(t_m) \Delta t_m}, \end{aligned} \right\} (15)$$

где  $m = 0, 1, 2, \dots, \eta$ .

Численное интегрирование проводилось для линии, имеющей параметры:  $R=18$  Ом;  $L=0,9$  Гн. Короткие замыкания происходили в точках  $K_0, K_1, K_2, K_3, K_4$ , отстоящих от начала линии соответственно на 0; 0,17; 0,33; 0,67; 0,83 ее общей длины. Питающая система имела внутреннее сопротивление  $R=3$  Ом;  $L=0,15$  Гн и э. д. с., равную 6 В. В качестве начальных условий был принят нагрузочный режим с  $R(0)=21$  Ом и  $L(0)=1,05$  Гн.

Приближенный расчет  $\rho_j$  проводился на основе общего решения при синусоидальном входном сигнале  $i=I_m \sin \omega t$  и к. з. в точке  $K_4$ . Для оценки, например,  $\rho_R$  можно записать

$$\Delta R(t) = \Delta R(0) \exp\left(-\frac{1}{2} \rho_R I_m^2 t\right) \exp\left(\rho_R I_m^2 \frac{\sin 2\omega t}{4\omega}\right).$$

Ориентируясь на время затухания переходного процесса 20 мс и пренебрегая модулирующим действием функции  $\exp(\rho_R I_m^2 \sin 2\omega t / 4\omega)$  на траекторию среднего экспоненциального движения  $\Delta R(t)$ , получим  $\rho_R \approx 675 000$  Ом·с/В·А. Значение  $\rho_L$ , найденное аналогично, составляет 6,9 Ом·с/В·А. Здесь и дальше считаем, что настройка заканчивается, когда отклонение параметров от их оптимальных значений не превышает 5%.

Для полученных значений  $\rho_j$  были рассчитаны результирующие графики переходных процессов настройки параметров (кривые 1 на рис. 4). С учетом того, что найденные значения  $\rho_j$  не являются оптимальными с позиций различных требований, были рассчитаны графики и при других значениях  $\rho_j$ , приведенные также на рис. 4. Кривой 2 соответствует  $\rho_R=450 000$  Ом·с/В·А,  $\rho_L=4,6$  Ом·с/В·А, а для кривой 3  $\rho_R=225 000$  Ом·с/В·А,  $\rho_L=2,3$  Ом·с/В·А. На этих же графиках показаны переходные процессы настройки параметров при к. з. в других точках для  $\rho_R=450 000$  Ом·с/В·А,  $\rho_L=4,6$  Ом·с/В·А.

На основе приведенных теоретических исследований и с целью экспериментальной проверки их результатов и возможности практического использования был разработан макет измерительного органа, структурная схема которого соответствует приведенной на рис. 3 (согласующие преобразователи ток — напряжение и напряжение — напряжение на схеме не показаны). Основными элементами являются интегральные перемножители 525 ПС I и операционные усилители К 140 УД 8 с рабочими напряжениями  $\pm 15$  В. Динамический диапа-

зон этих схем в ряде случаев применения может оказаться недостаточным. Однако уже в настоящее время имеются аналоговые интегральные схемы широкого применения с рабочими напряжениями  $\pm 40$  В и ожидается дальнейшее повышение последних. Измерительный орган в однофазном исполнении подключался к физической модели электропередачи, адекватной описанной выше. Она состояла из семи последовательно включенных  $RL$ -ячеек, сопротивления нагрузки и двух регулируемых источников питания  $C_1$  и  $C_2$ . Переток мощности обеспечивался из  $C_1$  в  $C_2$ .

На рис. 5 приведены осциллограммы изменения токов, отслеживаемых параметров и ошибки  $\varepsilon$  при тех же условиях задачи, что описаны выше. В качестве указателя времени можно использовать кривую э. д. с. источника  $C_1$  (на осциллограммах обозначена  $u$ ), амплитудное значение которой равно 6 В, при этом амплитуд-

ное значение тока в предаварийном режиме равнялось 18 мА.

Анализ расчетных и экспериментальных графиков показывает достаточно удовлетворительное их совпадение. Время достижения параметрами и ошибкой своих установившихся значений существенно меньше длительности переходного процесса, постоянная времени которого  $\tau$  составляет 50 мс. Если обеспечена монотонность процесса при к. з. в конце линии, то возникающие переключения при более близких к. з. не могут привести к неправильному действию защиты, кроме случая возникновения повреждения в начале линии. Здесь имеет место кратковременная перемена знаков контролируемых параметров, что учитывается правильным выбором характеристик срабатывания в пространстве параметров и дополнительным контролем напряжения ошибки. Выбор аperiодического или колебательного характера процесса может определяться желаемыми значениями времени достижения установившихся значений  $R$  и  $L$  и другими дополнительными условиями.

Существует неопределенность в измерении параметров в окрестности нуля, характерная для всех измерительных приборов. Если граничная точка характеристики срабатывания совпадает с началом координат, то избежать неселективных действий, обусловленных указанной неопределенностью при металлических замыканиях в начале линии, можно дополнительным подключением напряжения линии к сумматору через блок запаздывания с передаточной функцией  $Ke^{-\nu t}$ . Здесь  $K$  необходимо выбирать достаточно малым, чтобы не вызывать существенную погрешность в определении искоемых параметров.

**Выводы.** 1. Динамический контроль объектов на основе дистанционного принципа защиты обеспечивает высокую достоверность и быстродействие.

2. Теоретически и экспериментально показана возможность построения измерительного органа с приемлемыми характеристиками и достаточно простой реализацией на основе градиентного метода идентификации параметров динамической модели электропередачи.

3. Применение рассмотренных измерительных органов открывает возможности для создания устройств защиты с различными характеристиками в пространстве контролируемых параметров и позволяет фиксировать место повреждения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафонов А. И. Разработка и исследование измерительных органов дистанционной защиты на аналоговых решающих элементах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1975
2. Гельфанд Я. С., Зисман Л. С. Алгоритмы дистанционных органов защит от междуфазных повреждений на длинных линиях электропередачи. — Электричество, 1975, № 9.
3. Smolinski W. T. An algorithm for digital impedance calculation using a single PI section transmission line model. — IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-98, Sept. / Oct., 1979, № 5.
4. Girgis Adly A., Brown Grover R. Application of Kalman filtering in computer relaying. — IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-100, July 1981, № 7.
5. Евланов Л. Г. Контроль динамических систем. — М.: Наука, 1979.
6. Эйххофф П. Основы идентификации систем управления. — М.: Мир, 1975.
7. Дейч А. М. Методы идентификации динамических объектов. — М.: Энергия, 1979.
8. Урмаев А. С. Основы моделирования на АВМ. — М.: Наука, 1978.
9. Адаптивные системы идентификации / Под ред. В. Н. Костюка, А. Г. Кичу, В. Е. Краскевич и др. — Киев: Техника, 1975.

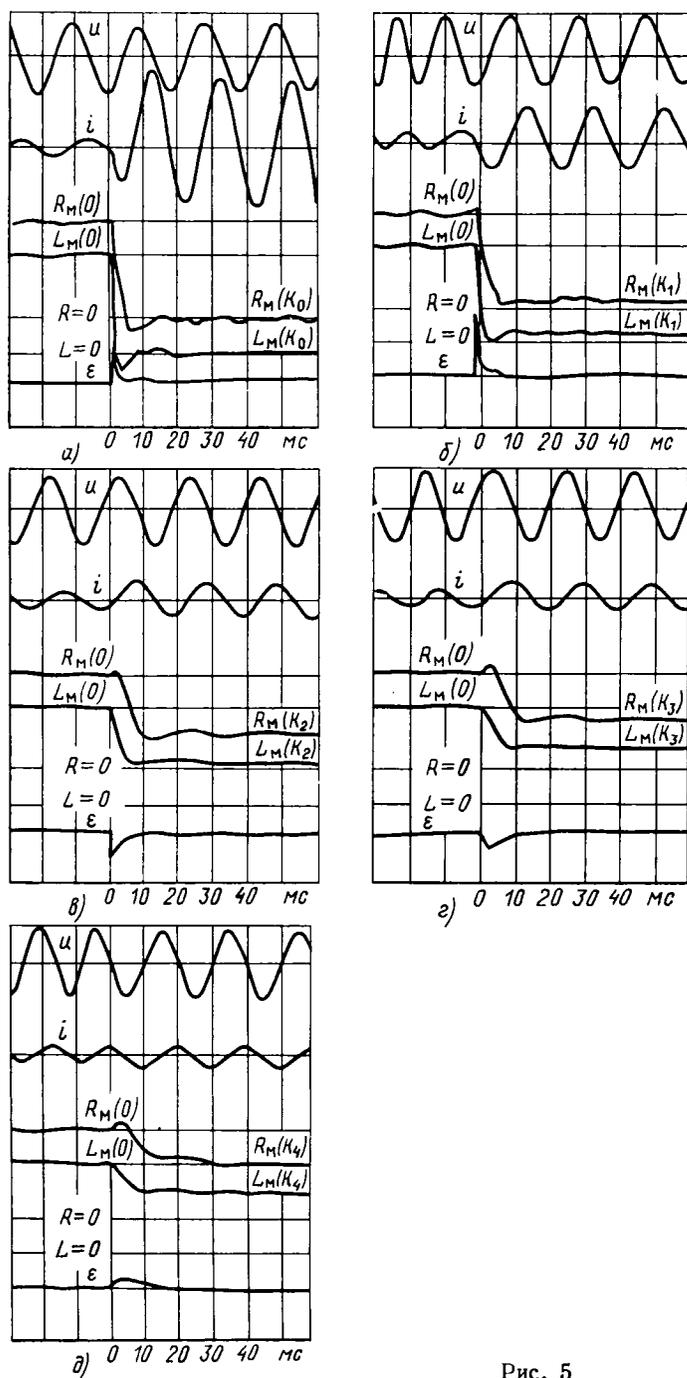


Рис. 5

[07.02.86]

Публикуя две статьи по вопросу совершенствования нормирования качества электроэнергии (авторы — Ю. С. Железко; Р. Р. Мамошин и В. Н. Никифорова), отражающие разные точки зрения на выбор показателей и принципов нормирования, редакция обращает внимание читателей, что высказываемые авторами идеи и предложения по способам их реализации не являются в настоящее время всесторонне обоснованными и выдвигаются главным образом как основа для дискуссии.

УДК 621.316.1.016.4.015.2:658.562.(083.74)

## О совершенствовании нормирования качества электроэнергии

ЖЕЛЕЗКО Ю. С., канд техн. наук

Показатели качества электроэнергии (ПКЭ) и нормы на него в настоящее время установлены в ГОСТ 13109—67\* [1]. Они регламентированы для точек присоединения электроприемников, хотя в упомянутом ГОСТ содержатся рекомендации о распространении ряда норм и на другие точки сети (без изменения их численных значений).

Опыт применения ГОСТ 13109—67 в практике проектирования и эксплуатации сетей и электроприемников (ЭП) показал, что нормирование качества электроэнергии (КЭ) нуждается в совершенствовании. В частности, при проектировании сетей потребителей<sup>1</sup> необходимы сведения о допустимых значениях ПКЭ в точках присоединения этих сетей к сетям энергосистем; при выборе уровня помехозащищенности ЭП, восприимчивых к различного рода искажениям, необходимо знать не только нормальные значения ПКЭ в точках их питания, но и возможные значения, которые должны быть учтены при конструировании ЭП. С другой стороны, необходимо нормировать уровни искажений, вносимых в сеть как отдельными ЭП, ухудшающими КЭ, так и потребителями в целом.

Необходимость нормирования КЭ на границах раздела сетей энергосистемы и потребителей обусловлена также введением в 1984 году скидок и надбавок к тарифу, определяющих финансовую ответственность за ухудшение КЭ [2].

Отечественные и зарубежные исследования последних лет показывают необходимость рассмотрения дополнительных ПКЭ, например, характеризующих кратковременные повышения и понижения действующего значения напряжения и вырезы и пики на его синусоиде, наложения ограничений на уровни отдельных гармоник и т. п. Требуют уточнения и нормируемые значения ПКЭ.

В данной статье рассмотрены некоторые принципиальные аспекты проблемы нормирования ПКЭ и даны предложения по его совершенствованию и созданию нормативно-технических документов, регламентирующих решение задач электромагнитной совместимости (ЭМС) оборудования сетей и ЭП на всех стадиях их проектирования и эксплуатации.

Нормативы КЭ, используемые при решении различных задач, должны представлять собой единый взаимосвязанный комплекс. Обеспечение помехозащищенности восприимчивых ЭП, так же как и разработка мер по ограничению отрицательного воздействия со стороны искажающих ЭП на КЭ в сетях, связаны с определенными затратами, поэтому оптимальное значение любого ПКЭ может быть получено из условия минимизации

<sup>1</sup> Предприятие, организация, учреждение, квартира и т. п., получающие питание от сети энергоснабжающей организации на основании договора на пользование электроэнергией.

суммарных затрат, включающих в себя также и затраты на изменение параметров сети. Такое определение оптимальных норм требует знания долевого участия всех типов ЭП в структуре потребления электроэнергии, зависимостей затрат на обеспечение ЭМС от уровней помех как для каждого типа ЭП, так и для сетей и т. п. Получение этих данных сложно даже для настоящего времени, а тем более для перспективы. Поэтому при установлении численных значений норм приходится в значительной степени ориентироваться на экспертные оценки. Численные значения норм, предлагаемые в настоящей статье, основаны на анализе опубликованных данных о влиянии КЭ на ЭП, документах МЭК и экспертных оценках автора статьи.

*Параметры электроэнергии, характеризующие ее качество.* Результаты исследований за последние 10 лет позволяют считать необходимым и достаточным улучшение следующих параметров электроэнергии (ПЭ): 1) отклонений частоты; 2) отклонений напряжения; 3) колебаний частоты; 4) колебаний напряжения; 5) кратковременных понижений и повышений действующего значения напряжения; 6) вырезов и пиков на синусоиде напряжения; 7) несимметрии трехфазной системы токов и напряжений; 8) гармонических искажений синусоидальной формы кривых токов и напряжений.

В приведенный перечень по сравнению с ГОСТ 13109—67 дополнительно введены кратковременные понижения и повышения действующего значения напряжения и вырезы и пики на его синусоиде.

Кратковременные понижения и повышения напряжения вызываются в основном переключениями коммутационных аппаратов и могут приводить к ущербу в сварочном производстве [3], сбоям устройств автоматики и управления [4] и т. п. Длительность таких понижений и повышений может составлять от долей секунды до нескольких секунд. В связи со специфическим характером воздействия на ЭП этот параметр следует рассматривать в дополнение к колебаниям напряжения, нормы на которые, как известно, определяются усталостью человеческого глаза при мерцаниях источников света.

Вырезы на синусоиде напряжения вызываются коммутационными процессами преобразователей. Так же как и пики, вызываемые переходными процессами, они представляют собой помехи, воздействующие в основном на устройства автоматики, управления и передачи сигналов.

Ниже рассмотрены показатели, которыми, на взгляд автора, целесообразно характеризовать качество электроэнергии применительно к перечисленным выше параметрам.

*Показатели качества электроэнергии.* Влияние ПКЭ на технико-экономические показатели электрооборудо-

вания и электроприемников обычно проявляется за определенный период времени  $\theta$ , что правильно отражается усредненными (кумулятивными) показателями вида [5, 6]:

$$X_{\theta} = \frac{1}{\theta} \sqrt{\int_{t-\theta}^t X^k(t) dt}, \quad (1)$$

где  $X$  — рассматриваемый параметр электроэнергетики, изменяющийся во времени;  $k$  — степень воздействия параметра на ЭП (например, при воздействии в виде нагрева  $k=2$ ; воздействие на срок службы ламп накаливания отражает значение  $k=14$  и т. д.);  $\theta$  — время осреднения, в течение которого рассматриваемое воздействие проявляется (например, при нагреве  $\theta$  — постоянная времени нагрева; в зависимости от вида ЭП  $\theta$  может достигать нескольких десятков минут).

При использовании показателей вида (1) для нормирования КЭ в узлах электрических сетей возникает ряд трудностей, связанных, с одной стороны, с необходимостью устанавливать единые значения  $k$  и  $\theta$ , несмотря на их индивидуальный характер для каждого вида ЭП, а с другой, — с отсутствием приборов, позволяющих измерять кумулятивные ПКЭ. Серийно выпускаемые с 1985 г. приборы контроля КЭ [7] измеряют текущие значения ПКЭ с последующей их статистической обработкой.

Указанные соображения говорят о целесообразности нормировать в электрических сетях текущие значения ПКЭ<sup>2</sup> и уровень вероятности допустимого их превышения, как это принято в действующем стандарте [1], а показатели вида (1) использовать при оценке допустимости режима работы конкретных ЭП (см. ниже).

В связи с изложенным отклонения частоты и напряжения целесообразно характеризовать показателями, установленными в действующем стандарте:

$$V = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100, \quad \% \quad (2)$$

$$\Delta f = f - f_{\text{ном}}, \quad \text{Гц.} \quad (3)$$

При этом в отличие от действующего ГОСТ отклонение частоты предлагается характеризовать его текущим значением, а не осредненным за 10 мин.

В качестве ПКЭ для колебаний частоты предлагается использовать размах изменения фазы напряжения (в эл. град.). Дело в том, что кратковременные изменения частоты в узле (переходы от одного установившегося ее значения к другому) вызываются резкими изменениями активной мощности нагрузки и соответствующими изменениями поперечной составляющей вектора падения напряжения. При набросе нагрузки скорость изменения фазы вектора вычитается из его нормальной скорости  $50 \times 360 = 18\,000$  град/с, а при сбросе нагрузки прибавляется, что аналогично эффекту от изменения частоты. Вместе с тем практика использования ГОСТ 13109—67 показала, что показатель «колебания частоты» большинством пользователей стандарта воспринимается неверно и считается характеризующим

работу энергосистемы, а не установок потребителей, поэтому представляется целесообразным заменить его на показатель «колебания фазы напряжения», определяемый по формуле

$$\Delta\varphi = |\varphi_{t1} - \varphi_{t2}|, \quad (4)$$

где  $\varphi_{t1}$  и  $\varphi_{t2}$  — значения аргумента вектора напряжения в узле в моменты времени, различающиеся на 1 с.

Данный показатель легко определяется расчетным путем:

$$\Delta\varphi = \arctg(\delta P \cdot X/U^2), \quad (5)$$

где  $\delta P$  — наброс (сброс) активной нагрузки;  $X$  — реактивное сопротивление сети, от которой питается нагрузка;  $U$  — напряжение сети, к которому приведено сопротивление  $X$ .

Что касается вида ПКЭ, характеризующего колебания модуля напряжения, то по литературным данным точка зрения здесь едина — таким ПКЭ должна быть «доза колебаний». Этот показатель принят и в стандартах МЭК. При его использовании отпадает необходимость устанавливать волевым порядком границу между отклонениями и колебаниями напряжения по скорости изменения последнего. Дозу колебаний определяют за установленный интервал  $\theta$  по формуле

$$\Psi = \frac{1}{\theta} \int_{t-\theta}^t g_f^2 \delta V_f^2 dt, \quad (6)$$

где  $g_f$  — весовой коэффициент, отражающий степень воздействия на зрение колебаний с частотой  $f$ ;  $\delta V_f$  — размах колебаний частотой  $f$ . Обычно  $\theta = 10$  мин, что соответствует времени, за которое проявляется утомление глаза.

Кратковременные понижения и повышения действующего значения напряжения могут характеризоваться продолжительностью  $t_n$ , величиной  $\Delta V$  и частотой  $f_n$  (1/ед. времени). Для некоторых ЭП критичной может оказаться площадь понижения за единицу времени. Последнее имеет, например, значение для сварочных машин и ЭВМ [3, 4]. В этом случае ПКЭ будет иметь вид «дозы». В отечественных стандартах, на взгляд автора в качестве ПКЭ целесообразно использовать величину и продолжительность повышений (понижений) напряжения, а также их частоту.

Пики напряжения в соответствии с рекомендациями МЭК в отношении преобразователей характеризуются такими показателями как энергия, относительная амплитуда пика, время нарастания напряжения от 0 до 0,5 и от 0,1 до 0,9 амплитуды пика. Эти ПКЭ целесообразно использовать и в отечественных стандартах.

Несимметрию трехфазной системы напряжений принято характеризовать относительными значениями напряжений обратной и нулевой последовательностей —  $U_2$  и  $U_0$ . Оба напряжения приводят к неравенству фазных (а напряжение обратной последовательности — и междуфазных) напряжений, отклонения которых от номинала нормируются. Наложение ограниченный непосредственно на  $U_2$  и  $U_0$  целесообразно в том случае, если их отрицательное воздействие проявляется не только через отклонения фазных или междуфазных напряжений. Такое воздействие  $U_2$  на трехфазные вращающиеся машины хорошо известно. Поэтому в качестве ПКЭ, характеризующего несимметрию, целесооб-

<sup>2</sup> Под текущими значениями ПКЭ здесь и далее понимаются показатели, время осреднения которых  $\theta$  не превышает 3 с. Такое осреднение принимается с целью сглаживания резких изменений ПКЭ при переходных процессах, что соответствует рекомендациям МЭК в отношении гармоник. Осреднение не относится к ПКЭ, характеризующим ПЭ № 3—6 из перечисленных в предыдущем разделе.

разно использовать коэффициент обратной последовательности напряжения  $\varepsilon_2 = (U_2/U_{\text{ном}}) \cdot 100, \%$ .

Нормирование же напряжения нулевой последовательности в настоящее время затруднительно, так как нет данных о его самостоятельном влиянии на оборудование (не через отклонения напряжения), например, воздействию на линии связи, заземляющие устройства, коррозию подземных сооружений, нагрев кожухов трехфазных трансформаторов и т. п. Вместе с тем наличие нулевой последовательности приводит к увеличению потерь электроэнергии в сети. В связи с этим в ряде рекомендаций предлагается нормировать  $U_0$ .

В качестве ПКЭ, характеризующих гармонические искажения синусоидальности кривых токов и напряжений, целесообразно использовать коэффициент несинусоидальности напряжения и уровни отдельных гармонических составляющих, на которые должны налагаться дополнительные ограничения.

В силу случайного характера изменения нагрузок и инерционности устройств регулирования режимов сетей целесообразно для каждого ПКЭ нормировать два значения — нормальное и допустимое рабочее. Нормальное значение ПКЭ должно использоваться как расчетное при проектировании сети, а при эксплуатации соблюдаться в течение основной части времени работы (например, в течение не менее 95 %). Допустимое рабочее значение ПКЭ характеризует возможное КЭ, которое может наблюдаться в течение остальных 5 % времени.

При конструировании ЭП параметры подводимого напряжения должны учитываться таким образом, чтобы при ПКЭ, находящихся в пределах нормальных значений, обеспечивалось нормальное функционирование ЭП с соблюдением всех паспортных характеристик. В случае больших отклонений от номинальных параметров (вплоть до допустимых рабочих значений) ЭП должен оставаться в работе, однако его характеристики могут ухудшиться. Характер этого ухудшения или ограничения времени работы при таких условиях должны отражаться в технических условиях (ТУ) и в инструкциях по эксплуатации ЭП. Там же должны указываться предельные значения ПКЭ, при которых ЭП работает устойчиво, если они не равны рабочим значениям.

Нормы на допустимые нормальные и рабочие значения перечисленных ПКЭ в электрических сетях, к которым могут присоединяться ЭП или потребители, должны быть приведены в стандарте на нормы качества электроэнергии в электрических сетях общего назначения. Областью применения этих норм является проектирование и эксплуатация электрических сетей.

*Нормирование искажений, вносимых в сеть ЭП массового производства.* Здесь имеются в виду те ЭП, которые могут быть приобретены потребителем и подключены к сети без уведомления энергоснабжающей организации, т. е. преимущественно ЭП коммунально-бытового назначения. Нормы на эти искажения и методы проверки соответствия выпускаемых ЭП этим нормам должны быть изложены в отдельном стандарте, областью применения которого является конструирование ЭП и проверка их на стадии производства.

Значения напряжений обратной и нулевой последовательностей, высших гармоник, размахов колебаний напряжения и т. п., вызываемых ЭП, определяются током  $I_n = I_n' - jI_n''$  и сопротивлением внешней сети  $Z_n = R_n + jX_n$  применительно к рассматриваемому виду

искажения:  $U_n = Z_n I_n$ . Нормы накладываются на модуль  $\dot{U}_n$ , определяемый по формуле

$$U_n = \sqrt{(I_n' R_n + I_n'' X_n)^2 + (I_n' X_n - I_n'' R_n)^2}. \quad (7)$$

При использовании (7) на стадии конструирования ЭП необходимо ориентироваться на некоторые расчетные параметры сети  $R_{н.р} + jX_{н.р}$ ; последние должны быть нормированы для сетей, к которым непосредственно подключаются ЭП (т. е. преимущественно до 1000 В). При известных (нормированных) значениях  $U_{н.р}$ ,  $R_{н.р}$  и  $X_{н.р}$  из (7) может быть определена область допустимых сочетаний значений  $I_n'$  и  $I_n''$ , вносимых всеми ЭП, присоединенными к данной сети. Допустимые искажения от одного ЭП  $i$ -го типа —  $I_{ni}'$  и  $I_{ni}''$  — определяются через известные допустимые суммарные значения  $I_{н.д}'$  и  $I_{н.д}''$ , количество ЭП каждого типа  $n_i$  и коэффициенты их участия в создании общего уровня искажений  $k_{эмси}$ :

$$\sum_{i=1}^m (I_{ni}' - jI_{ni}'') k_{эмси} n_i \leq I_{н.д}' - jI_{н.д}'', \quad (8)$$

где  $m$  — число групп однородных ЭП.

Очевидно, что даже при известной перспективной оснащенности расчетной сети приемниками каждого типа  $n_i$  и ясном механизме суммирования искажений, определяющем значения  $k_{эмси}$ , из (7) не могут быть однозначно определены  $2m$  неизвестных значений  $I_{ni}'$  и  $I_{ni}''$ . Их определение представляет собой оптимизационную задачу, для решения которой должны быть известны затраты на снижение искажений до требуемого уровня для всех типов ЭП, в том числе и перспективных. В силу трудностей такого решения приходится принимать дополнительные допущения, например равенства норм на относительные значения токов искажений от любого типа ЭП (по отношению к потребляемому группой ЭП току прямой последовательности) и возможности арифметического суммирования токов искажений от разных ЭП (т. е. отсутствия компенсации искажений). В этом случае для определения нормы на допустимый ток искажения от конкретного типа ЭП вместо неизвестных  $k_{эмси}$  могут быть использованы известные коэффициенты участия ЭП в суммарной нагрузке  $k_{yi}$  [8]. В этом случае допустимый ток искажения от конкретного типа ЭП определяют по формуле

$$I_{ni}' - jI_{ni}'' = (I_{н.д}' - jI_{н.д}'') \frac{I_{номi}}{I_{ном\sigma} k_{yi}}, \quad (9)$$

где  $I_{номi}$  и  $I_{ном\sigma}$  — номинальный ток, потребляемый рассматриваемым ЭП, и суммарный, потребляемый всеми видами ЭП, генерирующими помехи рассматриваемого вида.

Для реализации такого подхода к определению норм должны быть предварительно установлены (согласованы, нормированы) значения  $I_{номi}$ ,  $n_i$  и  $k_{yi}$  для всех типов ЭП, присоединенных к типовой расчетной сети, имеющей нормированные значения  $Z_n$  для каждого вида помех.

При создании ЭП индивидуального проектирования (мощные прокатные станы, сталеплавильные печи и т. п.) и проектировании системы электроснабжения потребителя в целом допустимость искажений также может оцениваться по формуле (7), однако в этом случае в расчет принимаются конкретные параметры внешней сети, соответствующие точке присоединения объек-

та. Узловые сопротивления  $R_{\Sigma} + jX_{\Sigma}$  для каждого вида искажений могут быть получены либо отдельными расчетами [9], либо с использованием мощности короткого замыкания в узле, типовых соотношений  $X/R$  для сетей различных классов напряжения и соотношений между параметрами сети на различных частотах.

Из изложенного видно, что нормы на допустимые искажения, вносимые ЭП и потребителями в целом, в конечном итоге выражаются через ограничения, накладываемые на параметры токов.

*Учет случайного характера параметров режима сети.* Нормирование ПКЭ в условиях случайного характера их изменения во времени сводится к установлению допустительно к норме значения вероятности, с которой эта норма должна соблюдаться. Численные параметры любого закона распределения однозначно характеризует любая пара из множества соответствующих друг другу значений случайной величины и вероятности. Конкретное же соотношение численных значений нормы и вероятности, с которой она должна соблюдаться, зависит от характера изменения контролируемой величины в конкретной ситуации, поэтому теоретически соотношение вероятности и нормы не может быть установлено однозначно «заранее» [10].

При решении задачи оценки технической допустимости режимов работы конкретного оборудования при случайном характере воздействующих на него внешних факторов такое положение трудностей не вызывает. В этом случае можно ориентироваться на предварительные измерения случайного процесса изменения ПКЭ и на основе анализа их результатов определять значенные вероятности, соответствующее установленной норме. Способы оценки допустимости режимов работы оборудования при случайном характере воздействующих факторов целесообразно изложить в отдельном стандарте методологического характера.

При оформлении же договоров на пользование электроэнергией или выдаче исходных данных организации, проектирующей сеть потребителя, условия электроснабжения должны быть однозначно оговорены заранее, поэтому в этом случае приходится отступать от теоретического положения, изложенного выше, и устанавливать фиксированные численные значения соответствующих друг другу норм и вероятностей непосредственно в стандарте. При этом целесообразно ориентироваться на те пары значений, которые соответствуют более высокому уровню гарантированности (интегральной вероятности).

Исходя из изложенного, представляется целесообразным нормы на границах раздела сетей устанавливать в расчете на уровень интегральной вероятности 95 %, как это принято в действующем ГОСТ 13109—67. В случае же оценки допустимости режима конкретного оборудования уровень интегральной вероятности предлагается определять по кривым, аналогичным приведенным в [10] для нормального закона распределения. Такого рода кривые могут быть построены для характерных законов распределения, а также в виде верхней границы, используемой при неизвестном законе.

Последствия воздействия параметров режима сети на режим работы ЭП, как известно, накапливаются, что правильно отражается показателями, основанными на кумулятивном принципе [5]. Кумулятивный показатель определяют по формуле (1).

Для проведения автоматического контроля ПКЭ вида (1) необходимо иметь приборы с настраиваемыми значениями  $\theta$  и  $k$ , так как эти параметры для различных

типов ЭП различны. При этом показания прибора, полученные для ЭП с конкретными значениями  $\theta$  и  $k$ , нельзя использовать для оценки допустимости режима ЭП с другими  $\theta$  и  $k$ , присоединенного в этом же узле.

Вместе с тем при реализации кумулятивного принципа для большинства встречающихся практических случаев, в которых цикл изменения ПКЭ существенно меньше времени «отклика» ЭП на искажения, нет необходимости вводить параметр  $\theta$ , а учет параметра  $k$  может быть произведен расчетным путем по характеристикам исходного (не преобразованного) процесса  $X(t)$  [10].

Поэтому оценку технической допустимости режимов работы ЭП в конкретной ситуации<sup>3</sup> рекомендуется выполнять следующим образом. Если время перехода через нуль автокорреляционной функции процесса изменения ПКЭ существенно меньше (в два — три раза) постоянной инерции рассматриваемого ЭП, следует использовать кривые [10]. Если же это условие не соблюдается, следует использовать кумулятивный показатель в его общем виде (1), который должен вычисляться на ЭВМ по записи процесса  $X(t)$ . Допустимый уровень интегральной вероятности в этом случае определяют, сравнивая экономические последствия при равенстве кумулятивного показателя норме ПКЭ с затратами на предотвращение этих последствий.

Предлагаемый способ оценки допустимости режимов работы ЭП, так же как и предложения [5, 6], позволят избежать необоснованных капиталовложений в средства повышения КЭ.

*Учет совместного воздействия на ЭП нескольких ПКЭ.* Реальные условия, в которых окажутся ЭП с заданными (определенными при конструировании) характеристиками, как правило, будут в той или иной мере отличаться от проектных. В частности, одни ПЭ могут быть ниже расчетных, другие — выше. Если воздействие этих ПЭ (или части из них) выражается в одинаковой форме (например, в виде нагрева ЭП), то превышение некоторыми из них предельно допустимых значений не является основанием для разработки мероприятий по их снижению, если общее воздействие всех ПЭ не приводит к нарушению теплового режима ЭП. Для правильного определения допустимости режимов ЭП в условиях эксплуатации необходимо, чтобы в ТУ на каждый ЭП указывались не только допустимые значения отдельных ПЭ, но и функция этих ПЭ, определяющая допустимость их совместного воздействия.

Необходимость такого нормирования особенно очевидна для вращающихся машин. В литературе часто приводятся данные о снижении почти вдвое срока службы асинхронного двигателя в случае, если коэффициент обратной последовательности напряжения  $\epsilon_2$  равен 4 % вместо допустимых 2 %. Эти данные относятся к полностью загруженному двигателю. Вместе с тем известно, что двигатель редко бывает загружен на 100 %. При работе же некоторых типов двигателей, например с загрузкой 70 %, тепловой режим их не выходит за допустимый предел даже при  $\epsilon_2 = 18$  % (если отклонение напряжения  $V = +10$  %, а коэффициент искажения синусоидальности  $K_{\text{нс}} = 0$ ). Допустим и режим при  $K_{\text{нс}} = 65$  %,  $V = +10$  % и  $\epsilon_2 = 0$ .

Отсутствие норм на суммарное воздействие ПКЭ потребовало бы в каждом из этих случаев неоправданных затрат для подавления искажений, допустимых для

<sup>3</sup> Экономическая целесообразность такой работы ЭП должна проверяться дополнительно.

данного ЭП. В то же время режим двигателя оказывается недопустимым при одновременном нахождении ПКЭ в допустимых диапазонах, но на их границах ( $V = -5\%$ ,  $\varepsilon_2 = 2\%$  и  $K_{нс} = 5\%$ ), если двигатель загружен на 100% [11]. Необходимость учета совместного влияния ПКЭ выявлена также и для ЭВМ [4].

Из изложенного следует, что наличие таких функций для ЭП предотвращает необоснованные затраты в мероприятии по повышению КЭ. Для обобщенных узлов сети разработка таких функций практически невозможна, поэтому соответствие нормам в этом случае приходится проверять отдельно для каждого ПКЭ.

*Численные значения норм.* К сожалению, полных и всесторонних данных исследований, позволяющих обосновать численные значения норм с высокой точностью, в настоящее время нет. Исключение составляют, пожалуй, лишь колебания напряжения [6]. Вместе с тем, основываясь на опыте эксплуатации ЭП в различных условиях, на отдельных публикациях (в том числе МЭК) и экспертных оценках, могут быть предложены некоторые численные значения, которые следует рассматривать как первое приближение.

С точки зрения технических условий нормальной работы ЭП представляется необоснованно жесткой существующая норма 0,1 Гц для отклонений частоты. Анализ технических характеристик ЭП показывает, что большинство их типов нормально функционирует при отклонениях частоты до  $\pm 1$  Гц. Вместе с тем, например, скорость вращения двигателей прямо пропорциональна частоте и при снижении последней производительность механизмов, приводимых ими, падает. Экономические соображения заставляют ограничивать отклонения частоты более жестко, чем технические.

Представляется, что нормальные отклонения частоты могут быть установлены равными  $\pm 0,2$  Гц.

Нормальные и рабочие отклонения напряжения, исходя из анализа как технических характеристик выпускаемого оборудования, так и возможностей энергообеспечивающих организаций, могут быть установлены равными  $\pm 5\%$  и  $\pm 10\%$  соответственно.

Нормированное ГОСТ 13109—67 колебание частоты 0,2 Гц в секунду соответствует изменению фазы вектора напряжения 1,44 град за период. Исследования показывают, что резкое (теоретически мгновенное) изменение угла на 7—10 град может считаться допустимым. Следовательно, при мгновенном изменении фазы норма, соответствующая 0,2 Гц, оказывается неоправданно жесткой (в 5—7 раз), а при изменении фазы с постоянной скоростью в течение 1 с (более медленные изменения к колебаниям не относятся)—неоправданно мягкой (более чем в 7 раз). Поэтому допустимый размах колебания предлагается определять по формуле

$$\Delta\varphi_d = 72 \Delta t, \quad (10)$$

где  $\Delta t$  — время наброса (сброса) нагрузки, с.

Если  $\Delta\varphi_d$ , определяемое по (10), меньше 7 град, то это значение принимается в качестве допустимого. При этом к колебаниям фазы следует относить ее изменения, происходящие со скоростью 72 град/с и более<sup>4</sup>.

Колебания модуля напряжения целесообразно нормировать кривой, аналогичной приве-

<sup>4</sup> Значение 72 град/с соответствует 0,2 Гц. Оно не имеет полноценных обоснований и может быть откорректировано при их появлении. Основой предложения является не значение, а необходимость установления нормы в зависимости от  $\Delta t$ .

Номинальные напряжения, кВ	Допустимые значения, %			
	коэффициента обратной последовательности напряжения	коэффициента искажения напряжения	действующего значения гармоник напряжения	
			нечетных	четных
До 1	2	5	4	2
6—20	2	4	3	1,5
35	1,5	3	2	1
110 и выше	1	2	1	0,5

денной в ГОСТ 13109—67, но откорректированной в соответствии с публикацией 555—3 МЭК: наименьшее значение размаха колебания составит 0,29%, а соответствующее ему число размахов не  $20 \text{ с}^{-1}$ , как в действующем стандарте, а 17,6, что соответствует частоте синусоидальных колебаний 8,8 Гц. Для облегчения контроля колебаний напряжения в эксплуатируемых сетях необходимо дополнительно нормировать дозу колебаний, равную  $0,02 (\%)^2$  и соответствующую данной кривой. Необходимость ее введения объясняется тем, что для определения дозы колебаний, представляющей собой результат интегрирования колебаний, взвешенных по кривой  $g_f(4)$ , легче построить измерительный прибор [6].

Для кратковременных понижений и повышений действующего значения напряжения, вырезов и пиков на синусоиде автору в настоящее время трудно предложить численные значения норм.

Предлагаемые нормы на коэффициент обратной последовательности напряжения, коэффициент искажения напряжения и отдельные его гармонические составляющие, принятые на основании отечественных и зарубежных исследований, приведены в таблице.

Допустимые рабочие значения всех показателей качества в первом приближении могут быть приняты в 2 раза большими нормальных значений.

Нормированные сопротивления сетей 380 В на основной частоте, используемые в (7) для оценки допустимости колебаний напряжения, могут быть приняты в соответствии с Публикацией 725 МЭК равными  $(0,40 + j 0,25)$  Ом для однофазных ЭП и  $(0,24 + j 0,15)$  Ом — для трехфазных.

Сопротивление сети на частотах высших гармонических могут определяться через приведенные выше сопротивления по формулам:

$$R_v = 0,47R\sqrt{v}; \quad X_v = X_v,$$

где  $v$  — порядок гармоники.

*Выводы.* 1. Взаимозависимые значения показателей электромагнитной совместимости оборудования и электрических сетей должны регламентироваться комплексом стандартов. В настоящее время представляется целесообразным вместо ГОСТ 13109—67, устанавливающего нормы качества электроэнергии только у электроприемников, разработать стандарт, устанавливающий нормы на нормальные и рабочие значения показателей КЭ в электрических сетях всех напряжений.

2. Способы нормирования искажений, вносимых в сеть электроприемниками и потребителями в целом, должны быть установлены отдельным стандартом. В государственные и отраслевые стандарты на отдельные виды ЭП должны быть внесены конкретные нормы, ограничивающие уровень искажений, вносимых ими в сеть.

3. В технические условия на ЭП должны вноситься функции, характеризующие отдельные и совместное влияние на ЭП показателей, установленных в стандарте на нормы КЭ в сетях.

4. Способы оценки технической допустимости режимов работы оборудования при случайном характере воздействующих факторов, основанные на известных (приводимых в ТУ) функциях воздействия, должны устанавливаться специальным методологическим стандартом.

5. Показатели качества электроэнергии в узлах электрических сетей целесообразно устанавливать в виде текущих (не осредняемых) значений, которые должны соблюдаться с установленной вероятностью. Кумулятивный принцип воздействия параметров электроэнергии на режимы и технико-экономические характеристики ЭП может быть реализован без введения в стандарт кумулятивных показателей. В этом случае контроль соблюдения требований всех предлагаемых к разработке стандартов обеспечивается средствами измерений, выпускаемыми серийно с 1985 г. [7]. Дальнейшее совершенствование системы контроля и учета качества электроэнергии целесообразно осуществлять в направлении автоматизации различных контрольных функций [12], а не изменения вида измеряемых параметров.

6. Следует обратить особое внимание на неправильность отождествления понятий вида ПКЭ, вносимого в стандарт, и методов его анализа. Анализ ПКЭ может потребовать выделения медленных составляющих, трендов и других характеристик его изменения на различных (в том числе и достаточно продолжительных) интервалах времени. Ущерб от снижения КЭ может выражаться сложной функцией ПКЭ. Однако это не является основанием для использования этих характеристик

или функций в качестве ПКЭ. Кроме отмеченной методологической неправомерности, использование таких ПКЭ разрывает их связь с параметрами, измеряемыми оперативно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 13109—67. Нормы качества электрической энергии у ее приемников, присоединенных к электрическим сетям общего назначения.
2. Железко Ю. С., Копытов Ю. В., Стаи В. В. Применение скидок и надбавок к тарифу за качество электроэнергии. — Промышленная энергетика, 1984, № 12.
3. Вагин Г. Я. Влияние отклонений и колебаний напряжения на качество контактной сварки. — Промышленная энергетика, 1983, № 5.
4. Котельников О. И., Крахмалин И. Г. Влияние помех питающей сети на работу ЭВМ — Промышленная энергетика, 1982, № 7.
5. Кумулятивный принцип оценки качества напряжения/Э. Г. Куренный, Е. Н. Дмитриева, В. И. Ковальчук, А. Д. Колымыцев. — Электричество, 1987, № 9.
6. Шидловский А. К., Куренный Э. Г. Введение в статистическую динамику систем электроснабжения. — Киев: Наукова думка, 1984.
7. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
8. Тульчин И. К., Нудлер Г. И. Электрические сети жилых и общественных зданий. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
9. Мельников Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей. — М.: Энергия, 1972.
10. Железко Ю. С. О допустимой вероятности выхода случайного процесса за установленный уровень. — Изв. вузов. Энергетика, 1982, № 3.
11. Заславская Т. В., Железко Ю. С., Нейман В. В. О допустимых значениях токов и напряжений обратной последовательности при случайном характере их изменения. — Электричество, 1981, № 9.
12. Железко Ю. С. О перспективной системе контроля и учета качества электроэнергии. — Промышленная энергетика, 1986, № 7.

[15.09.86]

МАМОШИН Р. Р., доктор техн. наук, НИКИФОРОВА В. Н., канд. техн. наук

1. *Введение.* Системы электроснабжения общего назначения и электроприемники (ЭП) проектируют таким образом, чтобы наивысшие технико-экономические показатели достигались при питании их электроэнергией от симметричной трехфазной или однофазной системы напряжений заданной амплитуды синусоидальной формы частотой 50 Гц. По известным причинам в электрических сетях происходит нарушение данных функциональных свойств электрической энергии, что приводит к технико-экономическому ущербу. В связи с этим появление ГОСТ 13109—67, в котором были установлены номенклатура показателей качества электроэнергии (ПКЭ) и соответствующие нормы, сыграло положительную роль в повышении эффективности работы ЭП и систем электроснабжения.

Однако опыт применения ГОСТ 13109—67 выявил и некоторые его недостатки. Нормы качества электроэнергии (КЭ), установленные для зажимов ЭП, в практике эксплуатации часто относят к узлам электрических сетей, от которых получают питание потребители электроэнергии. Номенклатура ПКЭ не полностью отражает нарушения функциональных свойств электроэнергии и в ряде случаев односторонне отражает характер воздействия на работу восприимчивых ЭП. Отдельные ПКЭ установлены вне связи с задачами управления КЭ. Нормы отдельных ПКЭ не соответствуют требованиям МЭК и других международных организаций и в значи-

тельной степени не согласованы с нормами КЭ, установленными в стандартах на конкретные виды ЭП. Нуждаются в уточнении положения по контролю и обеспечению КЭ.

Совершенствованию стандарта в этих направлениях и посвящена настоящая статья.

2. *Номенклатура ПКЭ.* В соответствии с общими положениями ГОСТ 22851—77 при выборе номенклатуры ПКЭ следует учитывать: физическую сущность нарушения функциональных свойств электроэнергии; характер влияния, оказываемого данными нарушениями на работу ЭП; характеристики регулирующих (корректирующих) КЭ средств. Устанавливаемые ПКЭ должны способствовать повышению эффективности электроснабжения, быть достаточно простыми по форме, стабильными, наиболее полно характеризовать возникающие в реальных условиях нарушения функциональных свойств электроэнергии. Ниже анализируется существующая номенклатура ПКЭ и рассматриваются предложения по ее изменению.

2.1. *Отличие частоты питающего напряжения от 50 Гц.* Для оценки качества частоты в ГОСТ 13109—67 установлены два показателя: отклонение частоты и размах колебания частоты. Первый из них призван оценивать сравнительно «медленные» изменения частоты, так как значения данного ПКЭ определяются усреднением за 10 мин, а второй — «быстрые» изменения, происходя-

щие со скоростью более 0,2 Гц/с. Эти ПКЭ были предложены на основании проведенных в 50-х годах экспериментальных исследований изменений суммарной нагрузки и частоты, показавших, что в установившихся режимах работы энергосистем на медленные, почти периодические изменения суммарной нагрузки с основным периодом 24 ч всегда накладываются случайные изменения с минутными и секундными периодами [1].

Возросшая за прошедшее время мощность энергосистем, работающих, как правило, в системе энергообъединений, привела к снижению относительных амплитуд минутных и секундных изменений нагрузки, а соответственно, и изменений частоты. Кроме того, современные системы регулирования частоты и нагрузки обладают достаточным быстродействием и эффективностью для подавления случайных изменений нагрузки. Поэтому в настоящее время изменения частоты на суточном интервале времени представляют собой сглаженный процесс, на котором слабо выражены минутные и секундные изменения частоты. Они, как правило, не превышают 0,1 Гц, и их влиянием на технико-экономические характеристики ЭП можно пренебречь. Изменения частоты свыше 0,2 Гц, что присуще медленным, регулярным изменениям частоты при отсутствии достаточного резерва по активной мощности, приводят к существенным изменениям технико-экономических характеристик ЭП [2].

Учитывая вышеизложенное, предлагается исключить из стандарта ПКЭ «размах колебания частоты», а в качестве ПКЭ, характеризующего отличие частоты от 50 Гц, принять критерий текущего отклонения  $\Delta f$  (Гц)

$$\Delta f = f - f_{\text{ном}}, \quad (1)$$

где  $f$  — текущее<sup>1</sup> значение частоты;  $f_{\text{ном}}$  — номинальное значение частоты.

2.2. *Отличие напряжения от номинального значения.* Для оценки наблюдаемых в сети изменений напряжения в стандарте установлены два ПКЭ: отклонение напряжения и размах его изменения. Первый был введен для характеристики «медленных» изменений напряжения (со скоростью менее 1 %/с), а второй — «быстрых» (со скоростью более 1 %/с)<sup>2</sup>.

Известно, что случайный процесс изменения напряжения в любой точке сети может быть представлен совокупностью следующих составляющих (рис. 1): 1) медленных, почти периодических изменений с основным периодом 24 ч; 2) быстрых изменений периодических или случайных, вызванных в основном значительными набросами нагрузки некоторых видов ЭП с резкопеременным режимом работы (например, дуговые печи, электровозы, сварочные установки, электродвигатели насосов и др.). Как правило, размах таких изменений не превышает 10 %, а периодичность составляет от 1 изменения в час до 40 изменений в секунду; 3) провалов напряжения, вызванных короткими замыканиями в сетях энергосистем и потребителей и работой систем защиты, автоматического повторного включения и включения резерва. Глубина провалов может составлять от 10 до 100 %, а их длительность — от 10 мс до 20 с; 4) импульсов напряжения, вызванных атмосферными

явлениями, работой коммутационных аппаратов или определенных видов ЭП, например, дуговых печей, полупроводниковых преобразователей. Амплитуда импульсов может в несколько раз превышать номинальное напряжение сети, а длительность, как правило, не превышает 10 мс.

Реакция ЭП на различные виды изменений напряжения различна. Воздействие медленных изменений напряжения в пределах до  $\pm 10$  % от номинального напряжения на работу ЭП приводит в основном к дополнительным потерям энергии, к сокращению сроков службы и снижению производительности ЭП, к браку продукции. К быстрым изменениям напряжения с размахом до 10 % и средним уровнем, равным номинальному напряжению, наиболее восприимчивы осветительные приборы, При этом возникает известное явление — фликер, неблагоприятно воздействующее на зрение человека. К провалам и импульсам восприимчивы малоинерционные ЭП, в первую очередь — цифровые и электронные устройства.

Меры и средства, применяемые для компенсации каждого вида изменения напряжения, также различны. Для коррекции медленных изменений напряжения применяются инерционные средства регулирования (трансформаторы с РПН, ПБВ, линейные регуляторы и т. д.). Быстрые изменения напряжения (колебания) в значительной степени компенсируются с помощью быстродействующих регулирующих устройств (синхронные и статические компенсаторы и т. д.). Снижение числа провалов напряжения достигается выбором определенной схемы электроснабжения, установкой шунтирующих выключателей; для уменьшения амплитуды коммутационных перенапряжений применяют различного рода ограничители.

Различие в характере реакции ЭП на разные виды изменений напряжения и различие в мерах и средствах компенсации этих изменений предполагает возможность установления локальных ПКЭ, характеризующих эти явления. Основной вопрос при этом заключается в том, по какому принципу произвести разделение медленных и быстрых изменений напряжения. Ограниченность подхода, основанного на разделении по скорости изменения напряжения, особенно заметна, когда процесс изменения напряжения представляет собой синусоидальную модуляцию огибающей действующих значений напряжения.

Частотный подход к разделению изменений напряжения на медленные и быстрые составляющие более удобен [3]. Так, если реализацию исходного процесса изменения напряжения подать на вход низкочастотного фильтра, полоса пропускания которого лежит в пределах от 0 до  $F_{\text{кр}}$ , то на выходе этого фильтра будет получена реализация медленной составляющей процесса.

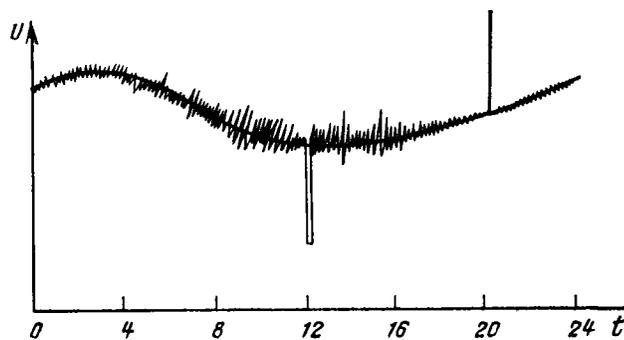


Рис. 1

<sup>1</sup> Для исключения влияния переходных процессов на результаты измерения целесообразно под текущим значением частоты понимать усредненную за 10 периодов питающего напряжения величину.

<sup>2</sup> В редакции стандарта 1979 г. указание скорости было оставлено только для «быстрых» изменений напряжения, т. е. колебаний напряжения.

Предлагается установить значение  $F_{кр}$  из следующих предпосылок. Инерционность основных систем регулирования напряжения в распределительных сетях (трансформаторы с РПН) составляет 1—2 мин, поэтому устойчивая их работа может обеспечиваться при изменениях напряжения с периодом 4—6 мин. С другой стороны, быстрые изменения напряжения в пределах  $\pm 5\%$  с периодами до 5—10 мин не оказывают влияния на электротермические, электролизные, электрографические и другие установки вследствие их значительной тепловой инерции; более медленные изменения существенно меняют производительность электротехнологических установок [4]. При размахах до 5—8 % миллисекундные и секундные изменения напряжения не воздействуют на работу сварочных установок, если напряжение не выходит за пределы  $\pm 5\%$  и даже  $\pm 10\%$ , не влияют на ЭВМ, если напряжение не выходит за пределы  $\pm 10\%$ ,  $\pm 15\%$  [4]. Электронные системы управления либо не восприимчивы к изменениям напряжения в пределах  $\pm 10\%$ ,  $\pm 15\%$ , либо безынерционно реагируют на изменения напряжения, что заставляет вводить стабилизацию напряжения для исключения влияния погрешности управления. Динамизм отклика асинхронных двигателей определяется в первую очередь инерцией вращающихся масс, однако секундные изменения напряжения с размахом до 5—10 % и средним уровнем, равным номинальному напряжению, не приводят к изменению частоты вращения свыше 1 %, что практически не сказывается на средней за час производительности приводных механизмов [5]. Изменения напряжения с периодами, измеряемыми минутами и более, будут оказывать существенное влияние как на производительность, так и на дополнительный нагрев в двигателях. Наиболее неблагоприятное воздействие такие изменения напряжения оказывают и на синхронные двигатели. Таким образом, для большинства ЭП существенное влияние оказывают изменения напряжения с наименьшим периодом несколько минут. Поэтому предлагается с учетом инерционности основных средств регулирования напряжения в распределительных сетях и восприимчивости большинства ЭП принять за медленные изменения напряжения изменения с наименьшим периодом 5—30 мин. Это соответствует установлению  $F_{кр}$  в диапазоне примерно 0,001—0,003 Гц. Тогда за отклонение напряжения  $\delta U$  следует принять (в %):

$$\delta U = \frac{U - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100, \quad (2)$$

где  $U$  — текущее действующее значение составляющей напряжения с частотным спектром от 0 до 0,001—0,003 Гц;  $U_{ном}$  — номинальное напряжение.

К быстрым изменениям напряжения следует относить непрерывные изменения любой формы (синусоидальной, прямоугольной, случайной и др.) в частотном диапазоне изменений напряжения от 0,001—0,003 до 25 Гц, а также редкие и резкие изменения напряжения, например, в результате пусков двигателей, происходящих 1—2 раза в час и более, т. е. с частотой появления 0,0001 Гц и более<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> В общем случае понятия частоты изменений напряжения и частоты появления изменений напряжения не адекватны. Первое из них имеет отношение к представлению непрерывных изменений напряжения в виде ряда или интеграла Фурье, а второе — к временной повторяемости резких изменений напряжения.

Предлагаемый принцип выделения медленных и быстрых составляющих изменений напряжения позволяет установить четкую ответственность за КЭ во взаимоотношениях между энергоснабжающей организацией и потребителями. Энергоснабжающая организация отвечает за медленные изменения напряжения, компенсировать которые она способна своими средствами регулирования напряжения, причем появляется возможность установить предельно допустимые значения отклонений напряжения в сети, например  $\pm 10\%$ . Потребители, характеризующиеся резкопеременной нагрузкой, обязаны в узле присоединения к сети энергоснабжающей организации выбирать средства, способные ограничить быстрые изменения напряжения до пределов, соответствующих установленным нормам на размах изменений напряжения. Данный принцип позволит избежать ненужного ужесточения требований к энергоснабжающей организации и вложения необоснованных капиталовложений при превышении текущими отклонениями напряжения нормы  $\pm 5\%$  с вероятностью свыше 0,05.

При установлении новых ПКЭ немаловажен вопрос об использовании существующих средств измерения для контроля этих показателей. Если вблизи точки контроля отсутствует резкопеременная нагрузка (показание приборов через 3 с меняется не более чем на 0,3—0,5 %), то измерение отклонений напряжения можно вести любым способом, изложенным в [6], в том числе с помощью специализированных приборов типа 43203. Если вблизи точки контроля располагается резкопеременная нагрузка (это легко установить по показаниям приборов), то результаты измерений текущих значений напряжения следует обработать: средние значения за каждые 5—30 мин будут характеризовать медленную составляющую напряжения, а размах изменений напряжения на каждом интервале 5—30 мин — быструю. Следует отметить, что дифференциация изменений напряжения на медленные и быстрые составляющие давно принята в нормативно-технических документах Электрисите де Франс [2] на необходимость четкого разделения между быстрыми и медленными изменениями напряжения указывают и документы МЭК [7].

Установленный в действующем стандарте ПКЭ «размах изменения напряжения» достаточно полно характеризует возникающую при быстрых изменениях нестабильность напряжения, а нормы на данный ПКЭ установлены исходя из восприимчивости зрения человека к изменениям светового потока, обусловленным колебаниями напряжения на зажимах осветительных приемников. Однако применение данного ПКЭ в условиях эксплуатации при произвольной форме изменения напряжения и частоте изменений более 1 Гц требует значительных трудозатрат при обработке измерительной информации об изменениях огибающей действующих значений напряжения. Поэтому на основании исследований [8—11] в качестве дополнительного ПКЭ, характеризующего эффект воздействия изменений напряжения на зрение человека в диапазоне 0,5—25 Гц, можно принять критерий «доза фликера»  $\psi$  (%):

$$\psi = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t g_F^2 \delta U_p^2(F) dt, \quad (3)$$

где  $g_F$  — коэффициент приведения изменений напряжения с размахом  $\delta U_p$  и частотой  $F$  к частоте 8,8 Гц;  $T$  — время накопления усталости зрительным анализатором человека ( $T=10$  мин).

Широкое использование данного ПКЭ возможно лишь при наличии специальных приборов — фликерметров, поэтому введение этого ПКЭ в практику эксплуатации целесообразно поставить в зависимость от оснащения ими электрических сетей.

Провалы напряжения, как это принято в [7, 12—14], предлагается оценивать (рис. 2) глубиной провала  $\delta U_n$  (%), длительностью провала  $\Delta t_n$  (с) и частотой провала напряжения  $F_n$  (1/ед. времени):

$$F_n = \frac{m(\delta U_n \Delta t_n)}{T}, \quad (4)$$

где  $m(\delta U_n, \Delta t_n)$  — число провалов напряжения с определенной глубиной и продолжительностью за время наблюдения  $T$ .

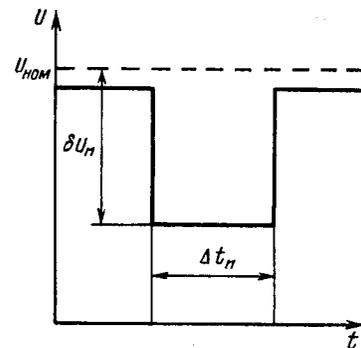
В качестве ПКЭ, характеризующего провал напряжения, рекомендуется в соответствии с [7] установить частоту провалов  $F_n$ , на которую способны воздействовать энергоснабжающая организация и потребители.

Для характеристики импульсов напряжения (перенапряжений) в [12, 13, 15] предлагается множество параметров: максимальная амплитуда, скорость нарастания в зоне наибольшей крутизны, время нарастания до максимальной амплитуды, продолжительность импульса на заданном уровне максимальной амплитуды, время затухания переходного процесса, частота повторения импульсов, амплитудно-частотный спектр и др. В качестве ПКЭ на первом этапе предлагается установить максимальную амплитуду импульса и его длительность на 50 %-ном уровне максимальной амплитуды. По мере накопления информации число параметров, характеризующих импульс, можно увеличить.

**2.3. Искажение синусоидальной формы кривой напряжения и несимметрия напряжений.** Для оценки возникающих в электрической сети искажений синусоидальности в ГОСТ 13109—67 установлен ПКЭ — «коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения»  $k_v$ . По своему виду данный ПКЭ характеризует дополнительный нагрев, связанный с наличием гармонических составляющих напряжения. С учетом инерционности теплового воздействия на работу ЭП предлагается вместо текущего значения суммы квадратов действующих значений гармонических составляющих рассматривать усредненное за определенный период времени (от нескольких минут до 30 мин) значение. Такой подход принят в Финляндии [16], рекомендуется в Швейцарии [17]. Для другой группы ЭП, в первую очередь ЭВМ, электронных систем управления, релейной защиты и др., воздействие несинусоидальности сопровождается практически немедленными функциональными нарушениями. В соответствии с характером восприимчивости данных ЭП к гармоническим помехам предлагается ввести в стандарт дополнительный критерий «коэффициент гармонической составляющей напряжения»  $k_{nV} = U_n / U_{ном}$ , где  $U_n$  — усредненное за 3 с действующее значение  $n$ -й гармоники (усреднение за 3 с рекомендуется в [18] для исключения влияния переходных процессов).

Все виды ЭП и элементов сети, восприимчивых к несимметрии напряжений, также можно разделить на две группы. Для группы ЭП с немедленными функциональными нарушениями под воздействием несимметрии напряжений (например, ЭВМ) целесообразно в качестве ПКЭ рассматривать установленные в стандарте текущие значения коэффициентов обратной и нулевой последовательностей. Для ЭП и элементов сети (электрические

Рис. 2



машины, трансформаторы и др.), реакция которых заключается в основном в дополнительном нагреве, целесообразно ввести в стандарт дополнительные ПКЭ: усредненные за определенный период времени (от нескольких минут до 30 мин) значения соответствующих коэффициентов. Аналогичный подход принят в рекомендациях Электрисите де Франс, в которых установлены нормы на текущие и усредненные за 15 мин значения ПКЭ, характеризующих несимметрию напряжений в сети [19].

**2.4. Колебания фазы напряжения.** Быстрые изменения активной нагрузки в узле сети приводят к изменениям фазы вектора напряжения в этом узле по отношению к неизменному вектору напряжения на зажимах первичных источников энергии. Воздействие, оказываемое подобными изменениями фазы напряжения на ЭП, зависит от динамических характеристик последних. Так, электронные системы управления, вентильные преобразователи и др. реагируют на изменение фазы вектора напряжения практически мгновенно (на полупериоде основной частоты питающего напряжения), а вращающиеся машины — с запаздыванием.

Учитывая широкий класс безынерционно реагирующих на изменения фазы напряжения ЭП, целесообразно в качестве ПКЭ рассматривать размах фазы напряжения на полупериоде основной частоты. Такой подход позволяет использовать серийно выпускаемую аппаратуру для определения данного ПКЭ через изменение длительности двух смежных полупериодов питающего напряжения. При этом можно считать, что частота вращения первичных источников энергии в энергосистеме остается неизменной на рассматриваемом интервале времени и изменение длительности полупериодов определяется изменением фазы вектора напряжения в данном узле сети. Тогда размах фазы напряжения  $|\Delta\phi$  (град) определяется по выражению

$$|\Delta\phi| = 18(T_1 - T_2), \quad (5)$$

где  $T_1, T_2$  — длительности смежных полупериодов напряжения, мс.

**3. Нормы.** Обеспечение устанавливаемых в стандарте норм неизбежно связано с дополнительными затратами на элементы системы, состоящей из источника электромагнитных помех, восприимчивого ЭП и связывающей их электрической сети. Очевидно, что оптимальные нормы КЭ должны устанавливаться из условия минимизации затрат на каждый из элементов рассматриваемой системы. Такое определение норм КЭ требует знания долевого участия различных типов источников помех и восприимчивых ЭП в структуре потребления, определения зависимости дополнительных затрат на каждый из элементов от изменения КЭ. В принципе данный подход может быть реализован в конкретной ситуации, например, при присоединении нового потребителя, ухудшающего КЭ, к существующей электрической сети.

<sup>4</sup> В данном контексте источник электроэнергии и ЭП, ухудшающие КЭ, объединены одним понятием «источник электромагнитных помех».

Однако при установлении норм в стандарте данный подход встречает известные затруднения, поэтому приходится полагаться на анализ основных типов источников помех и восприимчивости основных видов ЭП, на результаты проектирования типовых объектов электроснабжения и опыт их эксплуатации. Данный анализ, а также анализ зарубежных норм и рекомендаций в области КЭ были положены в основу приведенных в таблице норм на ПКЭ.

Частота провалов глубиной от 10 до 99 % и длительностью до 20 с не должна с вероятностью 0,95 превышать 0,25 1/ч, а частота провалов с глубиной 100 % (полное отключение) и длительностью до 1,5 с не должна быть более 0,125 1/ч. Амплитуда импульсов длительностью 0,2 мс не должна с вероятностью 0,95 превышать 500 % номинального напряжения сети, а длительностью 2 мс — 300 %.

Вышеприведенные нормы предлагается относить ко входу восприимчивых ЭП, присоединяемых к сетям общего назначения, а также к узлам электрических сетей общего назначения, к которым присоединяются различные потребители электроэнергии. Предлагаемое изменение оправдано практикой взаимоотношений энергоснабжающей организации и потребителей и соответствует рекомендациям МЭК и нормативно-технических документов Англии, ФРГ, США и др. [7, 10, 17, 20]. Нормы на зажимах ЭП, ухудшающих КЭ, должны быть установлены в стандартах на отдельные виды ЭП. Кроме того, по сравнению с действующим стандартом предлагается установить предельно допустимые значения ПКЭ дополнительно к нормам, определяемым с вероятностью 0,95 за определенный интервал времени наблюдения. Целесообразность установления предельно допустимых значений ПКЭ, с одной стороны, связана с широким распространением безынерционно реагирующих на изменение КЭ ЭП, а с другой — желанием обеспечить более четкую ответственность энергоснабжающей организации и потребителей за поддержание КЭ в требуемых пределах.

Численные значения норм ряда ПКЭ предложены на основании публикаций, некоторые из которых упоминаются ниже. Предельно допустимые значения размахов изменений напряжения (кривая А на рис. 3) соответ-

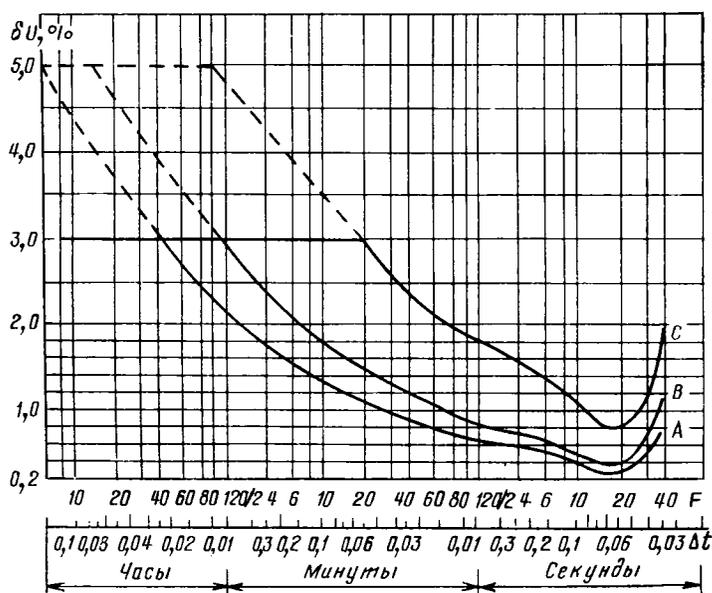


Рис. 3

№ п/п	Наименование ПКЭ, единица измерения	Нормы	
		с вероятностью 0,95	предельно допустимые
1	Отклонение частоты, Гц	$\pm 0,2$	$\pm 1,0$
2	Отклонение напряжения на входе ЭП*, %	$\pm 5$	$\pm 10$
3	Размах изменения напряжения в узлах электрических сетей, %: с бытовой нагрузкой с промышленной нагрузкой	$\pm 7,5^{**}$	рис. 3, кривая А рис. 3, кривые В*** и С****
		—	
4	Дозы фликера в узлах электрических сетей, (%) <sup>2</sup> : с бытовой нагрузкой с промышленной нагрузкой	—	0,02 0,04
		—	
5	Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, (%) в узлах электрических сетей напряжением: до 1 кВ 6—20 кВ 35 кВ свыше 110 кВ	5	7
		4	6
		3	5
		2	4
		—	—
6	Коэффициент гармонической составляющей напряжения (нечетной/четной, %) в узлах электрических сетей напряжением: до 1 кВ 6—20 кВ 35 кВ свыше 110 кВ	—	4/1
		—	3/0,75
		—	2/0,5
		—	1/0,25
		—	—
7	Коэффициент обратной последовательности напряжений, %	2****	3*****
8	Коэффициент нулевой последовательности напряжений, %	2****	3*****
9	Размах фазы напряжения, град	—	10

\* Допустимые отклонения напряжения в узлах электрических сетей, к которым подключаются потребители, устанавливаются в соответствии с [6].

\*\* В действующих электрических сетях сельскохозяйственного назначения.

\*\*\* Для электрических сетей с осветительной нагрузкой в виде ламп накаливания.

\*\*\*\* Для электрических сетей с осветительной нагрузкой в виде люминесцентных ламп.

\*\*\*\*\* Для усредненных значений ПКЭ.

\*\*\*\*\* Для текущих значений ПКЭ.

ствуют рекомендациям МЭК для бытовых сетей [11]. Эта кривая была получена в результате исследований фликер-эффекта на лампах накаливания мощностью 60 Вт. Кривые В и С предложены на основании исследований для ламп накаливания мощностью 150—200 Вт и люминесцентных ламп, применяемых с целью освещения производственных помещений на промышленных предприятиях [21]. Следует отметить, что в области частот 1—10 раз в час согласно [7, 8, 19, 20] существует возможность менее жесткого ограничения размахов изменений напряжения (показано на рис. 3 пунктиром). Допустимые значения доз фликера для бытовых и промышленных сетей рассчитаны по значениям размахов изменений напряжения для кривых А и В (рис. 3) при частоте 8,8 Гц в предположении прямоугольной формы огибающей действующих значений напряжения, являющейся наиболее критичной для зрения человека. Нормы на частоту провалов напряжения, амплитуду и длительность импульсов предложены на основании данных [11—13, 18], а также полученных в кабельной сети Ленэнерго и Поповым С. М. (ВНИИЭ). Нормы на гармонические составляющие напряжения предлагаются на основании рекомендаций МЭК [7], а на коэффициент

нулевой последовательности — по данным [22] и результатам расчетов, проведенных во ВНИИЭ.

4. *Контроль КЭ.* Оценка соответствия ПКЭ устанавливаемым нормам должна производиться за определенный период времени наблюдения, так как изменения ПКЭ в электрических сетях носят, как правило, случайный характер, что не позволяет судить о КЭ на основании единичных замеров. В действующем стандарте установлены разные значения длительности контроля для различных ПКЭ и различных видов ЭП. Это затрудняет как обработку результатов измерений, так и сопоставление результатов измерений одних и тех же ПКЭ, проведенных для различных ЭП. Поэтому предлагается установить единый период времени наблюдения для оценки соответствия нормам КЭ. В связи с тем, что изменение большинства ПКЭ в определенной степени отражает характер изменения либо суммарной нагрузки энергосистемы, либо сочетания суммарной нагрузки и нагрузки узла, в котором производится оценка КЭ, либо только нагрузки данного узла, интервал времени наблюдения можно установить на основании исследований характера случайных процессов изменения нагрузки узлов электрической сети общего назначения. При этом следует принимать во внимание необходимость ограничения наибольшего интервала времени, соответствующего вероятности 0,05, а также трудозатраты персонала, ведущего измерения. Анализ ритмичности изменения случайных процессов нагрузки позволяет, по мнению авторов, предложить 24 часа в качестве единого интервала времени наблюдения для оценки ПКЭ. В связи с тем, что в общем случае процесс изменения нагрузки носит нестационарный характер, оценку соответствия КЭ нормам целесообразно проводить на каждом интервале стационарности, на которые может быть разбит нестационарный процесс, т. е., как принято в [6], 2—4 раза в год отдельно для выходных и рабочих дней.

Сопоставимость результатов измерений КЭ, проводимых различными организациями, может быть обеспечена, если нормирован предел погрешности измерений. В зарубежных материалах об измерениях ПКЭ, в том числе [16, 18], рекомендуется принимать предел погрешности измерений, равный  $\pm 5\%$  от наименьших допустимых значений ПКЭ, установленных в таблице. Однако существующий парк измерительных приборов, в том числе специализированные приборы Житомирского ПО «Электроизмеритель», имеют в лучшем случае приведенную погрешность  $\pm 10\%$ . Данное значение и предлагается установить в качестве предела погрешности измерения. При этом сопоставление результатов измерений ПКЭ с нормой целесообразно проводить исходя из условия, что результат измерения с учетом погрешности измерения должен находиться в пределах нормированных значений.

5. *Обеспечение КЭ.* Обеспечение нормы КЭ требует организации соответствующей системы управления, включающей в себя стадии проектирования и эксплуатации электрических сетей и ЭП. Особое внимание, на взгляд авторов, должно быть обращено на стадию проектирования. Так, при проектировании сетей целесообразно исходить из условия, что нормы КЭ, соответствующие вероятности 0,95, должны обеспечиваться в нормальных эксплуатационных режимах работы сетей, причем в наиболее тяжелых нормальных и послеаварийных режимах значения ПКЭ не должны выходить за устанавливаемые в стандарте предельно допустимые значения.

При проектировании новых ЭП необходимо обеспечить нормальное их функционирование (с заданными технико-экономическими характеристиками) в нормальных режимах работы сетей и предотвратить их выход из строя в послеаварийных и даже аварийных режимах работы сетей. Это может быть достигнуто соответствующим выбором пределов помехоустойчивости и помеховосприимчивости ЭП<sup>6</sup> [23]. Так, для обеспечения заданной работоспособности и надежности функционирования проектируемого ЭП соотношение между пределом его помехоустойчивости  $N_y$  и нормой КЭ должно быть следующим:

$$N_y = N_{КЭ(0,95)} (1 + \alpha_y), \quad (6)$$

где  $N_{КЭ(0,95)}$  — норма КЭ, соответствующая вероятности 0,95;  $\alpha_y$  — коэффициент запаса устойчивости ЭП к помехе.

Конкретное значение  $\alpha_y$  должно определяться конструктором ЭП и его заказчиком исходя из электромагнитной обстановки, в которой должен работать ЭП, путем сопоставления затрат на увеличение коэффициента запаса и ущерба, возникающего от изменения работоспособности ЭП при воздействии на его помехи, уровень которой превышает норму КЭ с заданной вероятностью. Диапазон изменения  $\alpha_y$  может быть принят в пределах от 0 до  $N_{КЭ(1,0)}/N_{КЭ(0,95)}$ , где  $N_{КЭ(1,0)}$  — предельно допустимые значения ПКЭ. Определенный по формуле (6) предел устойчивости может оказаться недостаточным в условиях, когда на ЭП воздействуют разные виды помех, вызывающих ухудшение одних и тех же технико-экономических характеристик ЭП, например, дополнительный нагрев. В этом случае конструктору и заказчику ЭП целесообразно согласовать предельные значения одновременно воздействующих на ЭП помех, при которых должна сохраняться его работа с заданными характеристиками.

В послеаварийных режимах и редких аварийных режимах работы систем электроснабжения уровни помех могут существенно возрасти по сравнению с нормальным режимом, поэтому для предотвращения выхода из строя ЭП или появления недопустимого ущерба предел помеховосприимчивости  $N_b$  для ЭП целесообразно выбрать по условию:

$$N_b = N_{КЭ(1,0)} (1 + \alpha_b), \quad (7)$$

где  $\alpha_b$  — коэффициент запаса помеховосприимчивости ЭП, диапазон изменения которого может быть принят от 0 до 1.

Исходя из вышеизложенного предлагается в раздел стандарта по обеспечению КЭ ввести пункт, согласно которому при проектировании новых ЭП должны обеспечиваться нормируемые технико-экономические характеристики их работы при значениях ПКЭ на входе ЭП, не меньших, чем установленные в стандарте нормы  $N_{КЭ(0,95)}$ , а при значениях ПКЭ, не меньших, чем установленные в стандарте нормы  $N_{КЭ(1,0)}$  должна сохраняться работоспособность ЭП при отсутствии недопустимого ущерба. Если выполнить данные условия невозможно, то ЭП должен обеспечиваться дополнитель-

<sup>6</sup> Предел помехоустойчивости ЭП — значение ПКЭ на входе ЭП, при превышении которого ЭП перестает работать на заданном уровне работоспособности и надежности. Предел помеховосприимчивости ЭП — значение ПКЭ на входе ЭП, при превышении которого ЭП или выходит из строя, или ущерб, вызванный изменением его работоспособности, становится недопустимым.

ными или корректирующими устройствами, в том числе и системами бесперебойного питания, входящими в состав ЭП. Кроме того, в рекомендуемое приложение к стандарту целесообразно внести с соответствующими пояснениями выражения (6) и (7).

При проектировании ЭП, являющегося источником помех, встает вопрос о допустимом уровне помех, генерируемых им в сеть. В настоящее время этот вопрос решают, как правило, исходя из интересов ЭП, создающего помехи, и систем его управления. Однако помехи от таких ЭП, распространяясь по сети, могут вызвать неблагоприятные последствия у восприимчивых ЭП. Учитывая, что большинство источников помех может быть представлено источниками искажающих токов  $I_{\text{в.м.п}}$ , возмущение, создаваемое ими на входе восприимчивых ЭП, может быть выражено в виде напряжения искажения  $U_{\text{иск}} = I_{\text{в.м.п}} \Phi(z_c)$ , где  $\Phi(z_c)$  — функция, зависящая от сопротивления сети, связывающей источник помех и восприимчивый ЭП. Тогда для обеспечения нормальной работы восприимчивых ЭП необходимо, чтобы соблюдалось условие:  $N_{\text{КЭ}} \geq I_{\text{в.м.п}} \Phi(z_c)$ . Это условие справедливо при единственном источнике помех в сети. В реальных условиях в сети уже присутствует какой-то уровень помех, созданный источниками, установленными ранее, и на него будет накладываться уровень помех от нового ЭП. При этом суммарное искажение на входе восприимчивого ЭП по-прежнему не должно превышать  $N_{\text{КЭ}}$ , тогда для проектируемого ЭП можно записать:

$$\beta N_{\text{КЭ}} = I_{\text{в.м.п}} \Phi(z_c), \quad (8)$$

где  $\beta$  — коэффициент долевого участия данного ЭП в допустимом ухудшении КЭ в сети.

Вопрос о том, какая доля  $\beta$  должна быть выделена для проектируемого ЭП, может быть решен разными путями: на основе технико-экономического сопоставления затрат, на основании принципа равенства долевого участия всех источников помех или приоритета ранее установленных источников помех. Выбор того или иного пути может быть сделан после тщательного технико-экономического исследования типовых ситуаций в сети, а также широких экспериментальных исследований существующих уровней помех в сети. Следует подчеркнуть, что в этом вопросе недопустим волюнтаризм, простой перенос решений, принятых за рубежом, так как это может привести к неоправданным затратам.

Учитывая изложенное, предлагается внести в раздел стандарта по обеспечению КЭ пункт, обязывающий при проектировании ЭП устанавливать ограничения на отрицательное воздействие, вносимое ими в сеть, учитывающие необходимость обеспечения нормальной работы других ЭП, подключенных к той же сети, а в рекомендуемое приложение внести с соответствующими пояснениями выражение (8). Кроме того, в стандартах на отдельные виды ЭП целесообразно, по мнению авторов, устанавливать не только допустимые значения  $I_{\text{в.м.п}}$ , но и эталонные значения  $z_c$ .

При подключении новых потребителей к существующей сети также возникает необходимость обеспечить нормальную работу смежных потребителей и электроустановок энергоснабжающей организации, причем в конкретной ситуации может оказаться целесообразным отступление от норм стандарта как в сторону их ужесточения, так и ослабления. Внесение в стандарт пунктов, допускающих возможность отступления от норм при

наличии специальных технико-экономических обоснований, позволит избежать неоправданных народнохозяйственных затрат.

Рассмотренные в статье изменения к стандарту на КЭ не исчерпывают круг вопросов, подлежащих рассмотрению. В частности, следует рассмотреть необходимость разработки методических указаний по применению стандарта, в которых могли бы найти отражение вопросы контроля и расчета ПКЭ, решить вопрос о том, с интегральной вероятностью или с вероятностью попадания в допустимый диапазон нужно оценивать результаты наблюдения КЭ, и ряд других вопросов.

Научно и практически обоснованный подход к решению поставленных вопросов ускорит внедрение стандарта в электрические сети и в конечном счете послужит повышению эффективности и надежности работы ЭП и систем электроснабжения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Совалов С. А., Лезнов С. П., Смирнов М. И. Экспериментальное исследование режимных характеристик энергосистемы. — «Электричество», 1958, № 11.
2. Пелисье Р. Энергетические системы. — М.: Высшая школа, 1982.
3. Система показателей и нормирование качества электрической энергии / Б. А. Константинов, И. В. Жежеленко, В. Н. Никифорова и др. — Электричество, 1978, № 9.
4. Борисов Б. П., Вагин Г. Я. Электроснабжение электро-технологических установок. — Киев: Наукова думка, 1985.
5. Регулирование напряжения в электрических сетях. — В сб. докл. Всес. совещ. по вопросам регулирования напряжения в электрических сетях. Доклады II—I, II—13. М.: Энергия, 1968.
6. Методические указания по контролю и анализу качества электроэнергии в электрических сетях общего назначения. — В кн.: Инструктивные указания Главгосэнергонадзора. М.: Энергоатомиздат, 1983.
7. Публикации МЭК 77 (Секретариат) 64 и 77 (Секретариат) 65. Проект — Уровни электромагнитной совместимости для низкочастотных помех, передаваемых по системам электроснабжения. Ч. 1: Электромагнитное окружение для низкочастотных явлений. Ч. 2: Уровни электромагнитной совместимости для систем электроснабжения низкого напряжения. — 1985.
8. Gaussens P. Le flicker, son origine, sa mesure, ses conséquences et les moyens de son protéger. — Revue Générale de Electricite, 1962, t. 71, N 9.
9. Шидловский А. К., Куренный Э. Г. Введение в статистическую динамику систем электроснабжения. — Киев: Наукова думка, 1984.
10. Engineering recommendation P7/2. Supply to are furnaces. — United Kingdom. The Electricity Council, 1970.
11. Публикация МЭК 555-3. Помехи в системах электроснабжения, вызываемые бытовыми приборами и аналогичным электрооборудованием. Ч. 3. Колебания напряжения. — 1983.
12. Гурвич И. С. Защита ЭВМ от внешних помех. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
13. Стандарт СЭВ 4702—84. Универсальная международная система автоматического контроля, регулирования и управления (УРС). Изделие УРС. Общие методы испытания на устойчивость к электромагнитным помехам.
14. Chanas M. Perturbations de tension affectant le fonctionnement des réseaux: fluctuations brusques, flicker, déséquilibres et harmoniques. — Revue Générale de Electricite, 1978, t. 87, N 12.
15. Публикация МЭК 816. Методы измерения кратковременных переходных процессов в силовых низковольтных линиях и линиях связи. — 1984.
16. Kuronen P., Lahtinen M. Yliäaltojen mittaustekniikka a kantaverkon millaustuloksia. — Sähkö, 1979, 52, N 56.
17. Permissible level of harmonic voltages in low and medium voltage networks. — Bull. Assos. Suisse Electr. (Switzerland), 1982, vol. 73, N 1.
18. Публикация МЭК 555-2. Помехи в системах электроснабжения, вызываемые бытовыми приборами и аналогичным электрооборудованием. Ч. 2. Гармоники. — 1983.
19. Meynaud P. Pollution de la tension. — Revue Generale de Electricite, 1980, t. 89, N 9.

20. Siebald R. G., Bush J. F., Ward D. J. Flicker limitations of electric utilities. — IEEE Trans. PAS-104, 1985, N 9.

21. Регламентирование колебаний напряжения в осветительных установках промышленных предприятий / Б. А. Князевский, Т. П. Марусова, А. П. Овчинников, Г. Н. Яговкин. — Тр. МЭИ, 1977, вып. 342.

22. Маркушевич Н. С., Солдаткина Л. А. Качество напряжения в городских электрических сетях. — М.: Энергия, 1975.

23. Мамошин Р. Р., Никифорова В. Н. Вопросы нормирования ЭМС в электрических сетях. — Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей: Сб. докл. науч.-техн. совещ. Таллин, 1982. [20.11.86]



УДК 621.333.016.3.001.57

## Методы моделирования электрических нагрузок при программировании режимов ускоренных стендовых испытаний тяговых электродвигателей локомотивов

ИСАЕВ И. П., доктор техн. наук, КОЗЛОВ Л. Г., канд. техн. наук, ГЛУЩЕНКО М. Д., канд. техн. наук

МИИТ

В связи с ростом массы и длины поездов к надежности тяговых электродвигателей (ТЭД) локомотивов предъявляются повышенные требования. Транспорт несет существенные убытки от эксплуатации недостаточно надежных ТЭД, так как фактические показатели их надежности получают только после 2—3 лет опытной эксплуатации.

Значительно сократить время, необходимое для оценки этих показателей, можно как путем анализа тяговых расчетов, так и на основе анализа результатов ускоренных стендовых испытаний ТЭД в соответствующих режимах нагружения. Однако практика эксплуатации локомотивов показывает, что оценки надежности ТЭД, полученные из анализа тяговых расчетов не являются достаточно достоверными, так как условия работы локомотива на линии резко меняются от поездки к поездке, поэтому этот метод может рассматриваться только как первое приближение.

Наиболее достоверные результаты оценки показателей надежности ТЭД можно получить в результате ускоренных испытаний на специальных стендах. Одной из центральных задач таких испытаний является обоснование форсированных режимов нагружения и их моделирования в процессе проведения испытаний.

Для решения этой задачи нужно прежде всего установить случайную функцию, характеризующую процесс нагружения ТЭД в эксплуатации и разработать методику оценки ее параметров при ограниченном числе испытаний. Применяя вычислительную технику, аналитическое представление случайной функции нагружения ТЭД можно выполнить столь угодно точно, если заданы действительные входные параметры. Однако это требование практически не соблюдается и поэтому исходным материалом для обоснования математической модели процесса нагружения ТЭД служат данные эксперимента. При ограниченном числе опытов использование статистического среднего, статистической дисперсии и других статистических характеристик является вынужденной необходимостью, при которой особое внимание должно быть уделено проверке выдвигаемых гипотез нагружения.

На стендовых испытаниях ТЭД процесс нагружения можно моделировать эффективной величиной основного параметра нагружения, параметрами корреляционной функции процесса нагружения, используя связь среднего значения параметра с вероятными параметрами упорядоченной нагрузочной диаграммы, располагая орди-

наты ее по степени убывания параметра или используя в качестве входной величины значения функции спектральной плотности процесса нагружения. Применение того или иного метода зависит от глубины анализа процесса нагружения и обоснования основного параметра, характеризующего процесс нагружения.

В общем случае изменение нагрузки ТЭД — его тока в эксплуатации определяется различной последовательностью трех основных режимов работы локомотива: тяги, выбега, торможения, и кроме того переходными процессами за время регулирования этих режимов [1].

В качестве примера на рис. 1 приведена запись тока ТЭД электровоза ВЛ10 на участке Иркутск — Слюдянка при ведении поезда массой 4 тыс. т. Из анализа аналогичных записей нагруженности ТЭД в других условиях эксплуатации можно видеть, что процесс изменения их тока за время между очередными включениями, которые назовем циклом, не является стационарным. Однако от цикла к циклу повторяется характер изменения тока: интенсивный рост во время пуска и торможения, более или менее быстрый спад его при работе на естественной характеристике, длительность которого меняется в эксплуатации, и спад до нуля в конце цикла. Вместе с тем значения токов ТЭД на других участках пути и с поездами другой массы отличаются от приведенных на рис. 1. Их совокупность образует счетное множество, изменение которого во времени представляет собой случайную функцию.

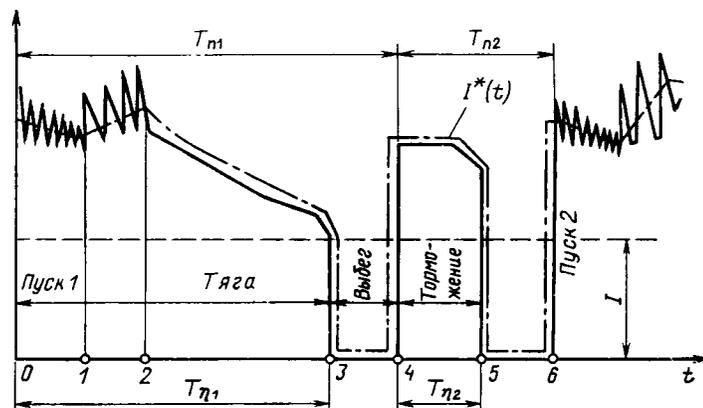


Рис. 1. График изменения тока двигателя. Режим работы: 01 — пуск 1; 12 — регулирование скорости; 23 — движение при постоянном режиме регулирования скорости; 34 — выбег; 45 — торможение (рекуперативное, резисторное); 6 — пуск 2

В связи с этим определение статистических характеристик тока следовало бы производить усреднением по ансамблю достаточно большого числа реализаций, полученных в идентичных условиях эксплуатации и в одно и то же время. Однако получить такие реализации тока на линии практически невозможно, поэтому ансамбль реализаций одного и того же процесса нагружения ТЭД приходится заменять ансамблем «квазиодновременных» реализаций, под которыми понимаем записи, полученные в идентичных условиях протекания процесса, но в разное время. При этом на такой ансамбль реализаций следует наложить условие «статистической синхронности», суть которого заключается в том, чтобы в начале координат системы  $I, t$  оказались точки, соответствующие началу работы локомотива со станции отправления. При такой «синхронизации» ансамбля реализаций нагрузок ТЭД остальные точки записей примерно совпадут и полученная таким образом случайная функция, характеризующая изменение тока ТЭД, будет отражать с практически приемлемой точностью статистические свойства исследуемого процесса.

Результаты расчета статистических характеристик тока ТЭД, как функции времени, по изложенной методике, представленные на рис. 2, свидетельствуют, что математическое ожидание  $M_i^*(t)$  и дисперсия  $D_i^*(t)$  не остаются постоянными. Поэтому, рассматривая ток двигателя как случайную функцию времени, полученную по ансамблю реализаций, следует учитывать, что она нестационарна.

Известно, что определение статистических характеристик нестационарных случайных процессов представляет весьма сложную задачу. Поэтому возникает задача повышения порядка нестационарности рассматриваемого процесса или приведение его к стационарному.

Одним из таких способов, неоднократно применяемым для анализа нестационарной случайной функции тока ТЭД, является метод «вырезания пауз» [2]. Однако использование этого метода в виде, предложенном в [2], некорректно в условиях рассматриваемой задачи, так как учитываются только участки работы под током, что значительно уменьшает дисперсию процесса. Поэтому более целесообразно определять статистические характеристики не тока ТЭД, а температур нагрева его обмоток. Действительно, несмотря на частые изменения тока ТЭД в процессе регулирования режимов работы, нагрев обмоток зависит от общего макроуровня нагрузки, так как тепловая постоянная времени ТЭД намного больше периода изменения его тока. В процессе исследования было установлено, что, как правило, такие процессы оказываются не только стационарными, но и эргодичными, если время усреднения существенно превышает время цикла нагрузки.

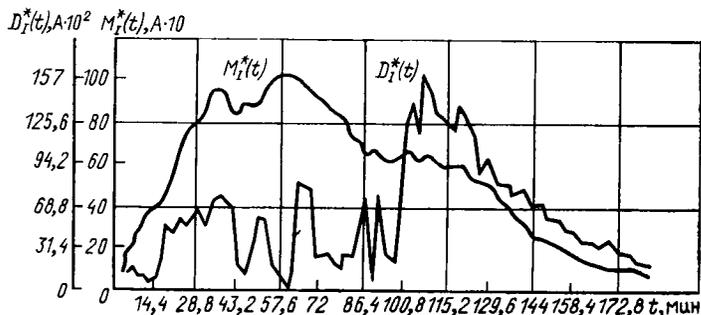


Рис. 2. Оценка математического ожидания и дисперсии тока двигателя для различных значений времени опытной поездки

С целью проверки этой гипотезы были рассчитаны на основании записей тока ТЭД во время тягово-эксплуатационных испытаний локомотивов на линии параметры превышения температуры нагрева обмоток ТЭД в функции пробега локомотива. При этом использовалась экспоненциальная зависимость

$$\tau_T = \tau_\infty (1 - e^{-\Delta t/T_M}) + \tau_0 e^{\Delta t/T_M}, \quad (1)$$

где  $\tau_T$  — превышение температуры обмотки ТЭД над температурой окружающей среды в конце участка;  $\tau_\infty$  — установившееся превышение температуры при токе  $I_D$  длительного режима;  $\tau_0$  — начальное превышение температуры;  $T_M$  — тепловая постоянная времени обмотки.

Для исследования была выбрана компенсационная обмотка ТЭД, поскольку ее нагрев лимитирует использование мощности двигателей ТЛ-2К электровоза ВЛ10.

Программа вычисления на ЦВМ текущих значений превышения температуры нагрева компенсационной обмотки составлена с учетом рекуррентности уравнения (1), причем зависимость  $\tau_\infty = f(I_D)$  представлена в виде интерполяционного многочлена второй степени:

$$\tau_\infty = 0,01 I_i^2 - 0,3 I_i + 65,5 \text{ при } I_i \geq 100A.$$

Шаг квантования  $\Delta t$  принят постоянным с учетом рекомендуемой точности тяговых расчетов  $\delta_i = \Delta t/T_M \leq 0,1$ . В рассматриваемом случае  $\delta_i = \Delta t/T_{K.0} = 0,016$ , где  $T_{K.0} = 1200$  с — тепловая постоянная времени компенсационной обмотки.

В результате расчетов установлено, что с течением времени величины  $M_T^*(t)$ ,  $D_T^*(t)$  не остаются строго постоянными, что подтверждает высказанное предположение о нестационарности процессов изменения тока и нагревания обмоток двигателя.

Зависимости  $M_T^*(t)$ ,  $D_T^*(t)$ , представленные на рис. 3 для наиболее напряженной компенсационной обмотки двигателя ТК-2К электровоза ВЛ10, определены на ЦВМ для различного времени  $T_{0.п}$  опытных поездок. Как видно, при длительной работе, например, при  $T_{0.п} \geq 7$  ч математическое ожидание и дисперсия превышения температуры компенсационной обмотки уже мало зависят от времени. Это подтверждается проверкой по критерию Романовского и нулевой гипотезой о равенстве генеральных дисперсий по критерию Фишера. При уровне значимости  $\alpha_p = 0,05$  критическое значение  $F_{кр} = 1,1$  превышает наблюдаемое  $F_{наб} = 1,06$  в точках  $a$  и  $b$  рис. 3. Критерий Романовского для математического ожидания температуры обмотки в точках  $a$  и  $b$  составляет  $R_p = 0,73$ , что меньше  $R_{p,кр} = 3$ .

Таким образом, можно принять, что при длительной эксплуатации математическое ожидание и дисперсия превышения температуры компенсационной обмотки не зависят от времени, т. е.  $M_T(t) = \text{const}$ ;  $D_T(t) = \text{const}$ .

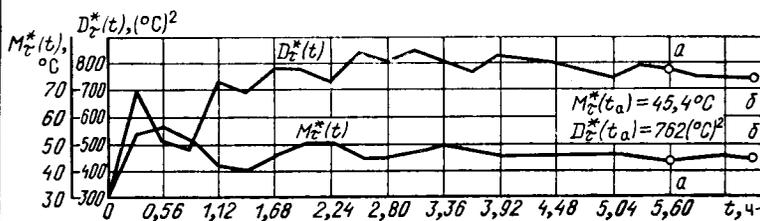


Рис. 3. Статистические оценки превышения температуры нагрева компенсационной обмотки, вычисленные на основании записей тока двигателей усреднением по времени шести опытных поездок

Полученная стационарность математического ожидания и среднего квадратического исследуемого процесса нагрева обмоток ТЭД позволяет предполагать, что этот процесс стационарен и по его корреляционной функции. С учетом этого были вычислены на ЦВМ нормированные корреляционные функции (рис. 4) для 15 и 30 случайно выбранных записей тока во время опытных поездок с различным шагом интегрирования и произвольным началом отсчета ординат. Физическое представление корреляционной функции, как функции связи среднего значения случайной величины с ее вероятным значением, позволяет использовать параметры корреляционной функции в качестве входных величин при программировании испытательных режимов ТЭД.

Из рис. 4 видно, что нормированная корреляционная функция затухает. Это свидетельствует об ослаблении связи между значениями превышения температур обмоток ТЭД по мере увеличения интервала времени, т. е. эргодичности процесса.

Практический интерес для выбора стендовых испытательных режимов представляет аппроксимация корреляционной функции  $K_T^*(\tau)$  аналитическим выражением, что дает возможность вычислить необходимый объем опытных поездок при выполнении условия стационаризации статистических характеристик исследуемого процесса, а также выявить период корреляционной функции, который определяет периодичность изменения температуры нагрева обмоток в процессе ускоренных стендовых испытаний.

Расчеты показали, что корреляционная функция  $K_T^*(\tau)$  для двигателя ТЛ-2К на участке Иркутск — Слюдянка может быть аппроксимирована выражением

$$K_T^*(\tau) = 770e^{-0,1 \cdot 10^{-3} \tau_R} \cos 1,2 \cdot 10^{-3} \tau_R,$$

где  $\tau_R$  — шаг квантования.

Эта зависимость позволяет определить  $\tau_{R \max}$  исходя из условия, что значение нормированной функции корреляции при  $\tau_R = \tau_{R \max}$  меньше некоторой малой наперед заданной величины  $\gamma$ . Для практических расчетов можно принять  $\gamma = 0,05$ . Тогда, исходя из условия  $\gamma \geq \exp \alpha \tau_{R \max}$ , найдем  $\tau_{R \max} = 8,35$  ч. Это значение  $\tau_{R \max}$  определяет длительность записи процессов при опытных поездках, начиная с которой оценки  $M_\tau(\tau)$ ,  $D_\tau(t)$  будут близки к постоянным и при дальнейшем увеличении длительности реализации существенно не изменятся.

Значение  $T_{0,п}$  определяется полуэмпирической зависимостью, обеспечивающей 2 %-ную погрешность при расчете корреляционной функции:  $T_{0,п} \approx 10 \tau_{R \max} = 80$  ч. Значение  $T_{0,п}$  может быть уточнено на основе критерия средней квадратической ошибки. В этом случае для определения  $T_{0,п}$  необходимо знать закон распределения случайного процесса исследуемой величины.

Кроме того, обнаруживается периодичность корреляционной функции нагрева обмотки, равная 1—1,45 ч. Эта периодичность может служить основанием для выбора одного из методов моделирования электрической нагрузки ТЭД в процессе ускоренных стендовых испытаний: запрограммировать изменение температуры нагрева обмоток с периодом основной частоты корреляционной функции, при которой амплитудное значение превышения температуры нагрева обмоток представляет дисперсию процесса, среднее значение — математическое ожи-

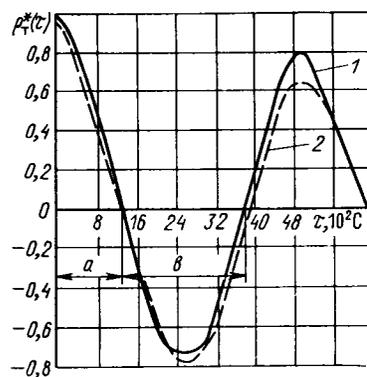


Рис. 4. Графики нормированной корреляционной функции превышения температуры нагрева компенсационной обмотки тягового двигателя, построенные по результатам 30 (кривая 1) и 15 (кривая 2) опытных поездок; a, b — константы, определяющие вид аппроксимирующего выражения корреляционной функции

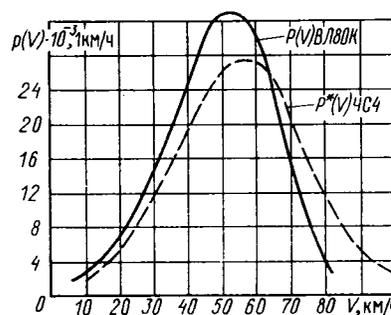


Рис. 5. Графики функций плотности распределения скоростей движения электровозов ВЛ80К и ЧС4 в эксплуатации

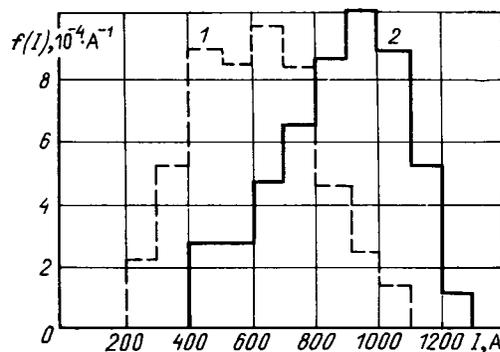


Рис. 6. Графики плотности распределения тока электродвигателя НБ-4186К для различных участков эксплуатации: 1 — участок Георгиу — Деж — Поворино; 2 — участок Красноярск — Чернореченская

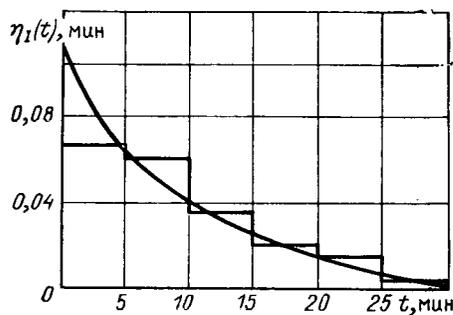


Рис. 7. Изменение длительности работы двигателя под током

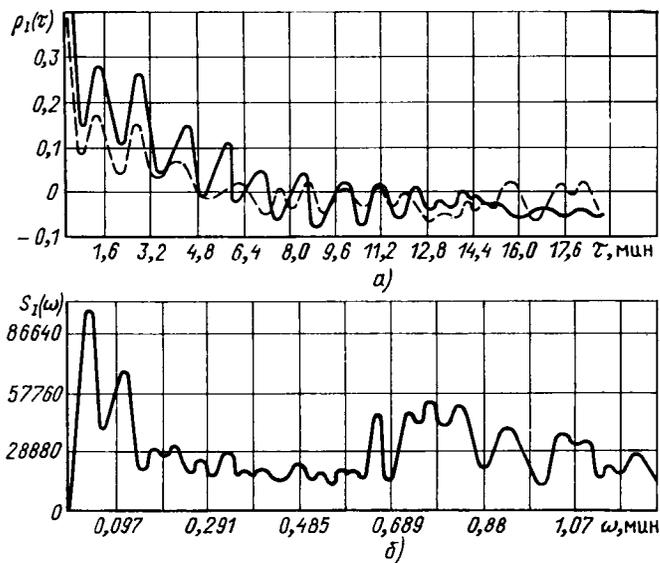


Рис. 8. Графики корреляционной функции (а) и функции спектральной плотности (б) тока двигателя НБ-418К6

дание. Например, для двигателя ТЛ-2К электровоза ВЛ10 (участок Иркутск — Слюдянка, сложный гористый профиль, применение электрического торможения) средняя температура обмотки ТЭД не должна превышать  $80^{\circ}\text{C}$ , минимальная и максимальная — соответственно  $20$  и  $140^{\circ}\text{C}$  с периодичностью изменения предельных температур  $1,5$  ч по программе трехмерной системы регулирования.

Время обоснования испытательных режимов ТЭД новых типов можно существенно сократить, если предположить статистическую устойчивость закона распределения скоростей движения локомотивов, т. е. изменения только параметров, но не вида распределения. В подтверждение справедливости этой гипотезы на рис. 5 приведены плотности распределения скоростей движения электровозов ВЛ80К и ЧС-4, эксплуатируемых на Восточно-Сибирской и Горьковской железных дорогах. Соответственно эти законы распределения не противоречат [четырем]моментным распределениям Пирсона первого рода при незначительном отличии параметров, хотя условия эксплуатации, режимы работы и мощность двигателей отличаются существенно. В таком случае задача определения статистических характеристик тока ТЭД нового типа сводится к отысканию плотности распределения тока по известной плотности распределения скорости движения локомотива, используя для этого электротяговую характеристику колесно-моторного блока локомотива. Решение этой задачи дает результат

$$p(i) = f[V(i) V'(i)],$$

где  $V(i)$  — зависимость скорости локомотива от тока ТЭД;  $p(i)$  — плотность распределения тока ТЭД.

Графически по функции плотности распределения находим функцию распределения  $G(i)$ , а по ней строим упорядоченную функцию распределений [2]:

$$\text{УНД}(i) = \arg[1 - G(i)].$$

Ординаты упорядоченной нагрузочной диаграммы (УНД), расположенные по степени убывания, являются статистическими характеристиками тока ТЭД в пределах интервала усреднения. Это позволяет программи-

ровать значение тока ТЭД в процессе стендовых испытаний. Для этого весь период испытаний разбиваем на этапы, которые соответствуют минимальным межремонтным циклам, а каждый этап разбивается на интервалы времени, соответствующие ступеням УНД. В пределах полученных интервалов поддерживается ток двигателя, равный ординате УНД. Например, для тягового двигателя НБ-507 минимальный межремонтный цикл соответствует пробегу  $25 \cdot 10^3$  км (пробег между ТР1) или составляет около  $500$  ч при средней скорости движения  $52$  км/ч, стендовые испытания двигателя должны производиться при токе  $1050$  А длительностью  $2$  ч, при  $1000$  А —  $2$  ч, при  $980$  А —  $2,5$  ч и т. д.

Ранее было показано, что работа локомотива под током чередуется с выбегом, функция тока разрывна и не обладает свойством стационарности. Однако можно допустить, что функция  $I(t)$  является произведением суммы двух непрерывных функций  $\bar{I}$ ,  $I^*(t)$  и импульсного процесса  $\eta(t)$ :

$$I(t) = \eta_I(t) [\bar{I} + I^*(t)], \quad (2)$$

где  $\bar{I}$  — математическое ожидание тока;

$$\eta_I(t) \begin{cases} 1 & \text{при } kT_n \leq t \leq kT_n + T_n; \\ 0 & \text{при остальных } t; \end{cases}$$

$T_n$  — длительность цикла;  $T_n$  — длительность импульса тока;  $k=0, 1, 2, \dots, \infty$ ;  $I^*(t)$  — случайная непрерывная функция времени (см. рис. 1).

Статистические характеристики величин, входящих в (2), определяют путем обработки записей тока двигателя на линии или, как первое приближение, по результатам тяговых расчетов. Так, на рис. 6 приведены гистограммы тока тягового двигателя НБ-418К6, на рис. 7 — гистограмма и плотность распределения длительности работы ТЭД под током, на рис. 8, а — корреляционные функции и на рис. 8, б — функция спектральной плотности тока для различных участков работы локомотива ВЛ80К на линии с поездами массой от  $2$  до  $4$  тыс. т. Анализ графиков показывает, что при существенном различии математических ожиданий тока на различных участках эксплуатации дисперсии, вычисленные по ансамблю реализации, отличаются незначительно, что подтверждается проверкой по критерию Фишера. Из рис. 7 и 8 видно, что длительность работы ТЭД под током  $\eta_I(t)$  — случайная величина, имеющая распределение Пуассона; корреляционная функция затухает; функция спектральной плотности имеет ограниченное число максимумов, причем основная энергия процесса сосредоточена на четырех частотах.

На конкретном участке эксплуатации функция  $I(t)$  характеризует стационарный (в широком смысле) случайный процесс, обладающий свойством эргодичности — постоянством математического ожидания и однородностью дисперсий, а также затухающим характером корреляционных функций (см. рис. 8, а). Следовательно, функцию  $I(t)$  можно представить в виде суммы ее математического ожидания и взаимно некоррелированных элементарных неслучайных функций [3] в виде

$$I(t) = \eta_I(t) \left[ \bar{I} + \sum_{i=1}^k I_i \varphi_i(t) \right],$$

где  $I_i$  —  $i$ -й коэффициент канонического разложения;  $\varphi_i(t)$  —  $i$ -я координатная функция.

Коэффициенты канонического разложения определяются параметрами функции спектральной плотности, поскольку средний квадрат стационарной функции пропорционален площади, ограниченной кривой спектральной плотности  $S_i(\omega)$  и осью абсцисс. Для централизованной случайной функции средний квадрат совпадает с дисперсией процесса. Следовательно, средняя величина квадрата амплитуды гармоники тока равна площади, ограниченной кривой спектральной плотности и частью оси абсцисс в пределах выбранного диапазона частот.

Количество гармоник канонического разложения по параметрам функции спектральной плотности целесообразно принять равным числу максимумов функции спектральной плотности. С целью уменьшения ошибки из-за конечного числа гармоник амплитуды их следует увеличить на величину

$$\Delta \hat{I} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{S^2(t) - \sum_{i=1}^k S_i^2(\Delta\omega)}{K}},$$

где  $S^2(t)$  — дисперсия процесса;  $S_i^2(\Delta\omega)$  — дисперсия процесса в диапазоне частот  $(0 - \omega_{\max})$ ;  $K$  — количество максимумов функции спектральной плотности.

Таким образом, амплитудное значение тока в диапазоне частот  $(0 - \omega_{\max})$  будет равно

$$\hat{I}_i = \sqrt{2} \sqrt{S_i^2(\Delta\omega_i) + \frac{S^2(t) - \sum_{i=1}^k S_i^2(\Delta\omega_i)}{K}}.$$

Как показали дальнейшие исследования, минимальное количество основных гармоник тока локомотивов ВЛ10, ВЛ80К, ВЛ80Т не превышает четырех. Моделирование в процессе стендовых испытаний может быть выполнено с помощью управляющих цифровых или аналоговых машин. Например, для тягового двигателя НБ-418К6 электровоза ВЛ80Т (Юго-Восточная железная дорога) ток во время испытаний должен моделироваться суммой постоянного значения  $I=540$  А и четырех гармонических составляющих:  $I_1=61$  А,  $I_2=75$  А,  $I_3=133,8$  А,  $I_4=129,2$  А с периодами соответственно  $T_1=125$  мин,  $T_2=52,3$  мин,  $T_3=7,85$  мин,  $T_4=5,46$  мин; длительность работы под током 10 мин, период повторения 20 мин.

Когда речь идет об оценке ресурса элементов ТЭД, например изоляции его обмоток, важно добиться подобия протекания процессов старения изоляции в эксплуатации и во время стендовых испытаний. Чтобы установить условия, при которых старение изоляции при испытаниях будет подобно старению при эксплуатации, были проведены исследования старения изоляции при различных уровнях нагрева обмоток  $\theta$  и ускорениях вибрации  $\omega$ , сообщаемой ТЭД. В результате экспериментов получены кривые жизни изоляции, характеризующие изменение во времени пробивного напряжения [4]. Для изоляции двигателей НБ-418К6, НБ-508А, НБ-406, РТ-113 кривые жизни изоляции имеют вид

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{пр.о}} \left(1 - \sqrt{D t e^{\alpha\theta + \beta\omega}}\right),$$

где  $U_{\text{пр.о}}$  — пробивное напряжение изоляции после изготовления двигателя;  $D$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  — постоянные, зависящие от конструкции и технологии изготовления изоляции (например, для тягового двигателя НБ-418К6  $D=2,56 \cdot 10^{-7}$ ,  $\alpha=0,045$  °C $^{-1}$ ,  $\beta=0,113$  g $^{-1}$ ; для якорей

двигателя НБ-50ВА  $D=4,2 \cdot 10^{-7}$ ,  $\alpha=0,034$  °C $^{-1}$ ,  $\beta=0,05^{-1}$  g $^{-1}$ ).

Используя выражение для кривых жизни изоляции, было показано, что пробивное напряжение изоляции за время испытаний  $t_{\text{и}}$  и за время эксплуатации  $t_{\text{э}}$  будет одно и то же, если выполняются соотношения между температурой и вибрацией при испытаниях  $\theta_{\text{и}}$ ,  $\omega_{\text{и}}$  и эксплуатации  $\theta_{\text{э}}$ ,  $\omega_{\text{э}}$  [4]:

$$\theta_{\text{и}} = \theta_{\text{э}} + \frac{\ln K_{\Phi}}{2\alpha}; \quad (3)$$

$$\omega_{\text{и}} = \omega_{\text{э}} + \frac{\ln K_{\Phi}}{2\beta}, \quad (4)$$

где  $K_{\Phi}$  — коэффициент форсирования, характеризующий во сколько раз время испытаний меньше времени эксплуатации.

Коэффициент форсирования при проведении испытаний обычно поддерживается постоянным. Тогда из выражения (3) следует, что при испытаниях нагрев обмоток должен быть выше нагрева в эксплуатации на постоянную величину. Учитывая, что согласно сказанному ранее средняя температура нагрева обмоток двигателя в процессе стендовых испытаний должна быть постоянной, а дисперсия температуры нагрева обмоток при испытаниях равна дисперсии нагрева в эксплуатации, то условие эквивалентности режимов по тепловому старению изоляции можно записать как

$$M[\theta_{\text{и}}] = M[\theta_{\text{э}}] + \ln K_{\Phi}/2\alpha, \quad (5)$$

а критерий подобия —

$$D[\theta_{\text{и}}] = D[\theta_{\text{э}}]. \quad (6)$$

Используя полученное условие эквивалентности и критерий подобия теплового старения изоляции, найдем статистические характеристики тока, удовлетворяющие данным условиям автоматодельности.

Температура нагрева обмоток при постоянных параметрах системы вентиляции и охлаждающего воздуха определяется током ТЭД:

$$\theta(t) = L_2 \{L_1 [I(t)]\}, \quad (7)$$

где  $L_1$  — оператор, преобразующий ток обмотки в ее установившийся нагрев;  $L_2$  — оператор, преобразующий установившийся нагрев в текущий нагрев.

Значит, для перехода от тока двигателя к текущему нагреву обмоток нужно выполнить двойное преобразование, для которого используем известное дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta}{T_{\text{м}}} = \frac{\theta_{\infty}}{T_{\text{м}}}, \quad (8)$$

где  $\theta$  — температура текущего нагрева обмотки;  $\theta_{\infty}$  — температура установившегося нагрева обмотки;  $T_{\text{м}}$  — тепловая постоянная времени обмотки;  $t$  — время.

При этом спектральные плотности на входе и выходе системы отличаются на квадрат амплитудно-частотной характеристики, т. е. в рассматриваемой задаче

$$S_{\theta}(\omega) = \left(\frac{1}{\sqrt{\omega^2 T_{\text{м}}^2 + 1}}\right)^2 S_{\theta_{\infty}}(\omega), \quad (9)$$

где  $\omega$  — частота, рад/мин, что позволяет определить дисперсию текущей температуры:

$$D(\theta) = \int_0^{\infty} S_{\theta}(\omega) d\omega = \int_0^{\infty} \frac{S_{\theta_{\infty}}(\omega)}{\omega^2 T_{\text{м}}^2 + 1} d\omega.$$

Если первое преобразование связано с линейной системой, то второе в силу нелинейной зависимости между током обмотки и ее установившимся нагревом выполним при допущении независимости составляющих уравнения (6), представив дисперсию в виде суммы дисперсии  $D_1(\theta)$ , обусловленной периодическим прохождением тока по обмоткам, и дисперсии  $D_2(\theta)$ , зависящей от степени отклонения тока относительно его среднего значения.

При определении  $D_1(\theta)$  учтем закономерности периодичности прохождения тока по обмоткам, которая не противоречит потоку Пуассона, и длина временного интервала от произвольного момента времени до ближайшего события (включения или отключения тока) слева или справа имеет плотность вероятности

$$f(T_n) = \nu \exp(-\nu T_n), \quad (10)$$

где  $\nu$  — число событий в единицу времени.

Следует отметить, что справедливость принятия распределения (10) подтверждается опытными данными. Так, для электроваз ВЛ80К участка эксплуатации Георгну-Деж — Поворино распределение длительности работы под током имеет вид

$$f(T_n) = 0,1 \exp(-0,1 T_n).$$

Учитывая, что в произведении случайной функции и постоянной величины ее корреляционная функция умножается на квадрат этой постоянной величины, найдем на основании преобразования Фурье функцию спектральной плотности установившегося нагрева в виде

$$\begin{aligned} S_{\theta_{\infty}}(\omega) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \theta_{\infty}^2 K(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau = \\ &= \frac{\bar{\theta}_{\infty}^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-2\nu(\tau) e^{-i\omega\tau}] d\tau = \frac{\nu \bar{\theta}_{\infty}^2}{\pi(4\nu^2 + \omega^2)}, \end{aligned}$$

где  $\theta_{\infty}$  — установившийся нагрев, соответствующий среднему значению тока  $I$ .

Аналогично получим согласно (9) функцию спектральной плотности текущего нагрева:

$$S_{\theta}(\omega) = \frac{\nu \theta_{\infty}^2}{\pi(4\nu^2 + \omega^2)(\omega^2 T_m^2 + 1)}. \quad (11)$$

Зная  $S_{\theta}(\omega)$ , найдем на основании критерия подобия (6) дисперсию нагрева обмотки в эксплуатации —

$$S_1^2(\theta_{\infty}) = \int_0^{\infty} S_{\theta}(\omega) d\omega = \frac{\theta_{\infty}^2}{4(1 + 2\nu_s T_m)} \quad (12)$$

и при стендовых испытаниях —

$$S_1^2(\theta_{\text{и}}) = \frac{\bar{\theta}_{\infty\text{и}}^2}{41 + 2\nu_{\text{и}} T_m}, \quad (13)$$

где  $\bar{\theta}_{\infty\text{и}}$  — установившийся нагрев обмоток, соответствующий среднему значению тока при испытаниях;  $\nu_{\text{и}}$  — число включений и отключений тока в единицу времени при испытаниях.

Исходя из условия равенства дисперсий, определим требуемое число включений и отключений тока в единицу времени при испытаниях:

$$\nu_{\text{и}} = \frac{\bar{\theta}_{\infty\text{и}}^2}{\theta_{\infty}^2} \left( \frac{1}{2T_m} + \nu_s \right) - \frac{1}{2T_m}. \quad (14)$$

Вторую составляющую дисперсии нагрева обмоток найдем, используя методику [4], согласно которой дисперсия установившегося нагрева  $D(\theta_{\infty})$  и дисперсия отклонений тока  $D(I)$  связаны соотношением

$$D^2(\theta_{\infty}) = \left[ \frac{\partial \theta_{\infty}(I)}{\partial I} \right]^2 D^2(I). \quad (15)$$

Дисперсия тока в диапазоне частот  $\omega_{k-1} \div \omega_{k+1}$  равна:

$$S^2(I) = \int_{\omega_{k-1}}^{\omega_{k+1}} S_I(\omega) d\omega, \quad (16)$$

где  $k = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  — число шагов дискретизации функции спектральной плотности.

С учетом (15) среднее значение функции спектральной плотности в интервале частот  $\omega_{k-1} \div \omega_{k+1}$  будет равно:

$$S_{\theta_{\infty}}(\omega_k) = \frac{1}{\Delta\omega} \left[ \frac{\partial \theta_{\infty}(I)}{\partial I} \right]^2 \int_{\omega_{k-1}}^{\omega_{k+1}} S_I(\omega) d\omega, \quad (17)$$

где  $\Delta\omega$  — шаг дискретизации.

Среднее значение функции спектральной плотности текущего нагрева представлено согласно [4] в виде

$$S_{\theta}(\omega_k) = \frac{1}{\Delta\omega(\omega_k^2 T_m^2 + 1)} \left[ \frac{\partial \theta_{\infty}(I)}{\partial I} \right]^2 \int_{\omega_{k-1}}^{\omega_{k+1}} S_I(\omega) d\omega. \quad (18)$$

Следовательно, дисперсия нагрева обмоток, вызванная отклонением тока относительно среднего значения, будет равна:

$$\begin{aligned} S_2^2(\theta) &= \sum_{k=1}^N S_{\theta}(\omega_k) \Delta\omega = \sum_{k=1}^N \frac{1}{\omega_k^2 T_m^2 + 1} \times \\ &\times \left[ \frac{\partial \theta_{\infty}(I)}{\partial I} \right]^2 \int_{\omega_{k-1}}^{\omega_{k+1}} S_I(\omega) d\omega. \end{aligned} \quad (19)$$

При моделировании тока ТЭД в процессе стендовых испытаний дисперсию нагрева обмоток можно определить по выражению

$$D(\theta_{\text{и}}) = \frac{1}{\omega_{\text{и}}^2 T_m^2 + 1} \left[ \frac{\partial \theta_{\infty}(I)}{\partial I} \right]^2 D^2(I_{\text{и}}), \quad (20)$$

где  $D(I_{\text{и}})$  — дисперсия тока при гармоническом законе изменения его в процессе испытаний.

Приравняв выражения (19) и (20), получим значение дисперсии тока относительно среднего значения как входного параметра для моделирования в процессе ресурсных испытаний изоляции обмоток тяговых двигателей:

$$\begin{aligned} S_2^2(I) &= \frac{\omega_{\text{и}}^2 T_m^2 + 1}{\left[ \frac{\partial \theta_{\infty}(I)}{\partial I} \right]^2} \sum_1^N \frac{1}{\omega_k^2 T_m^2 + 1} \left[ \frac{\partial \theta_{\infty}(I)}{\partial I} \right]^2 \times \\ &\times \int_{\omega_{k-1}}^{\omega_{k+1}} S_I(\omega) d\omega, \end{aligned} \quad (21)$$

Так, для ТЭД типа Н6-418К6 электроваз ВЛ-80Т при эксплуатации на Восточно-Сибирской железной дороге параметры испытательного режима, определенные по изложенной методике, следующие: постоянная со-

ставляющая  $\bar{I}=970$  А, гармоническая составляющая  $\bar{I}=230$  А с периодом 30 мин, длительность работы под током 6,8 мин с периодом повторения  $T=13,6$  мин.

Исследования позволяют рекомендовать использовать для ускоренных стендовых испытаний ТЭД следующие методы [моделирования нагрузок и области их применения]:

1. Температура нагрева обмотки двигателя — по параметрам корреляционной функции с использованием трехмерной системы регулирования, осуществляющей программное регулирование математического ожидания, дисперсии и периода корреляционной функции температуры нагрева обмоток двигателя в эксплуатации; цель испытаний — проверка назначенного ресурса изоляции обмоток двигателя при испытаниях в эксплуатационных режимах.

2. Токовые нагрузки — по параметрам упорядоченной диаграммы тока (ординаты УНД) при продолжительности действия, исходя из процентного соотношения вероятностей появления данного значения тока в эксплуатации; цель испытаний — проверка параметрической надежности элементов двигателя при испытаниях в эксплуатационных режимах.

3. Нагрузки двигателя — по параметрам функции спектральной плотности тока, осуществляя программное многомерное регулирование, при котором число управляющих воздействий равно числу максимумов функции

спектральной плотности тока плюс воздействия, определяемые величиной математического ожидания и цикличностью тока; цель испытаний — оценка параметрической надежности элементов двигателя при испытаниях в форсированных режимах, эквивалентных эксплуатационным.

4. Ресурс изоляции обмоток — по композиции статистик тока и нагрева обмоток двигателя в эксплуатации; осуществляется трехмерная система регулирования с управляющими воздействиями в виде суммы постоянной и периодической составляющих тока, значения которых определяются из условия подобия протекания процессов старения изоляции обмоток в эксплуатации и на стенде и параметров цикличности тока в эксплуатации; цель испытаний — определение ресурса изоляции обмоток по старению при испытаниях в форсированных режимах, эквивалентных эксплуатационным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенфельд З. Е., Исаев И. П., Сидоров Н. Н. Теория электрической тяги. — М.: Транспорт, 1983. — 328 с.
2. Гайдукевич В. И., Мельникова А. А. Обработка осциллограмм электрических величин. — М.: Энергия, 1972. — 313 с.
3. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. — М.: Советское радио, 1974. — 550 с.
4. Исаев И. П., Козлов Л. Г., Матвеевичев А. П. Прогнозирование надежности тяговых электродвигателей подвижного состава по результатам ускоренных испытаний. — Электричество, 1983, № 11, с. 36—40.

[28.02.86]

УДК 621.313.322-81.004.15

## Влияние значения номинальной частоты переменного тока на показатели турбогенераторов больших мощностей

ЗОЗУЛИН Ю. В., канд. техн. наук, КИЛЬДИШЕВ В. С., канд. техн. наук, ЧЕРЕМИСОВ И. Я., канд. техн. наук, КЕШИШЕВ В. Г., инж.

Харьков

В печати неоднократно поднимался вопрос об оптимизации частоты в электроэнергетических системах или их отдельных частях [1—3 и др.]. Вопрос этот очень сложен и его решение требует комплексного технико-экономического анализа. Одним из важных элементов такого анализа является рассматриваемая в настоящей статье оценка влияния номинальной частоты на показатели турбогенераторов.

Электромагнитная мощность электрической машины при неизменном активном объеме и неизменных электромагнитных нагрузках растет пропорционально частоте вращения, т. е. при неизменном числе полюсов — пропорционально частоте. При значительном увеличении частоты сохранение неизменной магнитной индукции в зазоре при холостом ходе затруднено вследствие резкого возрастания при этом магнитной индукции при нагрузках из-за увеличения э. д. с. за реактивным сопротивлением рассеяния. Кроме того, при неизменной частоте вращения и росте частоты с увеличением числа полюсов появляется возможность при неизменном активном объеме машины уменьшить ее габариты, снизив высоту спинки статора путем уменьшения магнитного потока на полюс [4, 5].

С другой стороны, с ростом частоты увеличиваются удельные потери в активных частях машины, возрастают реактивные сопротивления. Из изложенного следует,

что при отсутствии требований по применению стандартной частоты для электрических машин возможен и необходим поиск оптимальной частоты.

Анализ вариантов турбогенераторов с повышенной рабочей частотой при использовании всевозможных комбинаций частоты вращения, полюсности и геометрии турбогенератора в широком диапазоне мощностей довольно громоздок и может оказаться непоказательным во всех аспектах. Наибольший интерес представляет анализ турбогенераторов предельных мощностей при различных частотах. Используя результаты такого анализа, можно сделать некоторые выводы и о турбогенераторах меньших мощностей.

Предельная мощность при каждой частоте вращения определяется как максимальными размерами поковки ротора, так и электромагнитными нагрузками генератора.

Диаметр ротора определяется механической прочностью его узлов при воздействии центробежных сил. Бандажные кольца, являющиеся наиболее напряженными в механическом отношении узлами ротора, в настоящее время изготавливаются в основном из высокопрочной немагнитной стали с пределами текучести  $\sigma_s = 1000 \div 1250$  МПа. Для обеспечения необходимого запаса прочности ( $k=1,54$ ) должно выполняться соотно-

шение

$$\sigma \leq [\sigma] = \frac{\sigma_s}{k}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — напряжение, возникающее в бандажном кольце при испытательной частоте вращения от действия собственных центробежных сил и центробежных сил лобовых частей обмотки;  $[\sigma]$  — допускаемое напряжение в бандажном кольце с учетом необходимого запаса прочности.

Напряжения, возникающие в бандажном кольце при испытательной частоте вращения от действия собственных центробежных сил и центробежных сил лобовых частей, могут быть вычислены по выражению

$$\sigma = k_1 \frac{\gamma}{g} \left( \frac{\pi n \gamma}{30} \right)^2 D_n^2 \frac{3 + \mu}{16} \left[ 1 + \frac{1 - \mu}{3 + \mu} \alpha^2 \right] \times 10^{-6}, \text{ МПа}, \quad (2)$$

где  $\gamma = 7,85 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$  — удельный вес материала бандажного кольца;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения;  $\mu = 0,3$  — коэффициент Пуассона;  $D_n$  — наружный диаметр бандажного кольца;  $\alpha$  — отношение внутреннего диаметра бандажного кольца к наружному;  $k_1$  — коэффициент, учитывающий напряжения в бандажном кольце от центробежных сил лобовых частей обмотки (для быстроходных роторов  $k_1 = 1,3$ , для тихоходных  $k_1 = 1,45$ ).

Используя выражения (1), (2), определяем предельный наружный диаметр бандажного кольца. С учетом толщины бандажного кольца и высоты пазового клина, которая в основном определяется конструктивными особенностями узла посадки бандажного кольца на бочку ротора и мало зависит от частоты вращения ротора при традиционной конструкции посадочного узла, получаем предельный диаметр бочки ротора. Зависимость предельного диаметра бочки ротора от частоты вращения представлена на рис. 1.

Предельная длина бочки ротора во многом определяется величиной знакопеременных изгибных напряжений. Для приближенного определения этих напряжений ротор турбогенератора может быть представлен в виде симметричного ступенчатого вала, причем напряжения в сечении перехода от бочки к концу вала определяются формулой

$$\sigma_{и.к} = \frac{\gamma}{d^3} (4a^2 d^2 + 4alD^2), \quad (3)$$

а в середине бочки ротора

$$\sigma_{и.р} = \frac{\gamma}{D^3} \frac{J_D}{J_{min}} (4a^2 d^2 + 4alD^2 + l^2 D^2), \quad (4)$$

где  $D, d$  — диаметры бочки ротора и конца ротора;  $J_D, J_{min}$  — максимальный и минимальный момент инер-

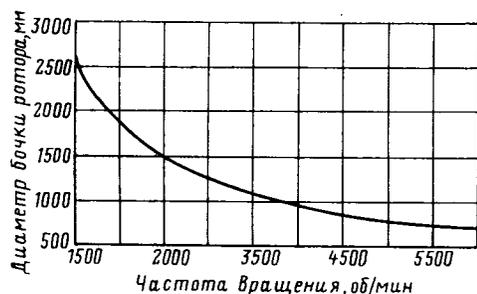


Рис. 1. Зависимость диаметра бочки ротора от частоты вращения

ции бочки ротора;  $l$  — длина бочки ротора;  $a$  — длина конца ротора.

Совместное решение этих уравнений позволяет определить значение  $l$ . Расчеты показывают, что для ранее найденного значения  $D$ , известных характеристик материала (удельный вес предел текучести, предел усталости), а также с учетом определяемых из конструктивных соображений величин рационально выбирать  $l/D \leq 6$ . При таком соотношении  $l/D$  статический прогиб ротора не превышает допустимых величин, и, учитывая расчетные значения критических частот вращения и форм свободных колебаний, нормальный пуск ротора может быть обеспечен тщательной балансировкой ротора. В практике турбогенеростроения известны случаи, когда применялись роторы и с большим отношением  $l/D$ .

Для определения максимальной мощности при рассчитанных выше размерах поковок роторов и различных частотах вращения были приняты следующие основные предположения: обмотки статора и ротора охлаждаются водой; скорость воды в обмотке статора не более 3 м/с; температура подогрева воды в обмотке статора не более 30 °С; скорость воды в обмотке ротора не более 8 м/с; сердечник статора охлаждается водородом; температура подогрева воды в обмотке ротора не более 35 °С; коэффициент полезного действия не ниже установленного ГОСТ 533—85; синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси не более 250 %; переходное индуктивное сопротивление не более 40 % для турбогенераторов мощностью 1000 МВт и ниже, 50 % для турбогенераторов 1500 МВт, 55 % для турбогенераторов 2000 МВт, 60 % для турбогенераторов 2500 МВт и более.

Возможность увеличения переходного индуктивного сопротивления для турбогенераторов мощностью 2000 МВт и более сверх 50 % должна быть рассмотрена отдельно. В данной статье турбогенераторы мощностью 2000 МВт и выше рассматриваются в четырехполюсном исполнении, при этом турбогенераторы имеют повышенные значения махового момента инерции, что в сочетании с применением современных средств регулирования и автоматики и использованием практически безынерционных тиристорных систем независимого возбуждения с высоким потолочным напряжением может обеспечить достаточные пределы по статической и динамической устойчивости при повышенных значениях предельного индуктивного сопротивления [6].

Линейная нагрузка статора выбиралась исходя из условия удовлетворения вышеизложенным требованиям, для чего были произведены предварительные расчеты и анализ нагрузок изготовленных и проектируемых турбогенераторов. Принятые максимальные значения линейной нагрузки в зависимости от номинальной мощности приведены на рис. 2.

В турбогенераторах с повышенной частотой тока статора следует ожидать некоторого усложнения проблемы снижения потерь и нагревов в торцевой зоне. Однако значительные успехи в решении данной проблемы, ко-

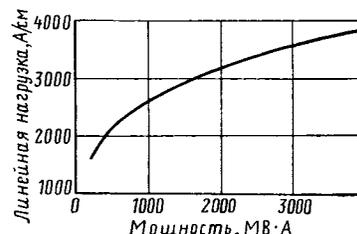


Рис. 2. Зависимость линейной нагрузки от мощности

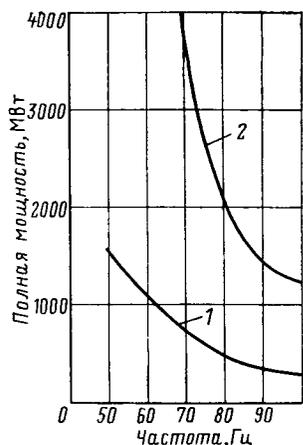


Рис. 3. Зависимость предельной мощности от частоты:  
1— $2p=2$ ; 2— $2p=4$

торые были достигнуты в последние годы отечественными и зарубежными турбогенераторостроителями для турбогенераторов с промышленной частотой, дают основание для положительного решения и для блоков с повышенной частотой тока статора [7, 8].

Магнитная индукция в воздушном зазоре выбиралась с учетом вышеуказанных условий, исходя из допустимой индукции в зубцах сердечника статора по условиям нагрева. Предполагалось, что для сердечников статоров применяется электротехническая сталь 3413 с направлением проката вдоль зубцов толщиной 0,5 мм при частоте 50—75 Гц и 0,35 мм при частотах выше 75 Гц. Так как величина потерь в стали зубцов в высокоиспользуемых турбогенераторах составляет небольшую часть в сумме всех потерь, то максимальная индукция в зубцах выбиралась только из условия допустимого нагрева стали. Максимальная допустимая индукция на высоте  $\frac{1}{3}$  зубца при нагрузке была принята для турбогенераторов с частотой 50 Гц около 2,2 Тл, а для турбогенераторов с частотой 100 Гц — около 1,95 Тл. Для турбогенераторов с частотой 50 Гц по условиям только нагрева зубцов можно было бы повысить допустимую индукцию, однако это увеличение опасно в связи со значительным возрастанием радиального потока в пазах и появлением аксиальной составляющей индукции в зубцах сердечника статора, что обусловлено насыщением стали и наличием радиальных каналов. Принятым значениям индукции в зубцах при нагрузке соответствуют значения индукции в зазоре при холостом ходе в интервале 0,9—1,1 Тл. Номинальные напряжения выбирались в интервале 15,75—30 кВ, при этом нижний предел относится к мощности 250 МВт, верхний — к 3000 МВт и более.

Ограничение номинального напряжения значением 30 кВ вызвано отсутствием данных о разработках турбо-

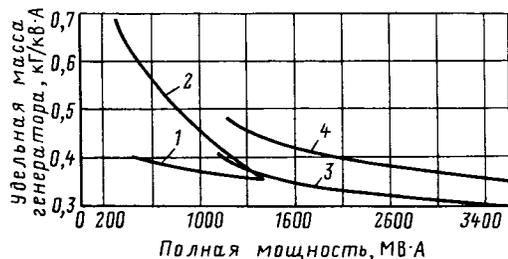


Рис. 4. Зависимость удельной мощности от полной мощности:  
1— $2p=2$ ,  $f > 50$  Гц; 2— $2p=2$ ,  $f = 50$  Гц;  
3— $2p=4$ ,  $f > 50$  Гц; 4— $2p=4$ ,  $f = 50$  Гц

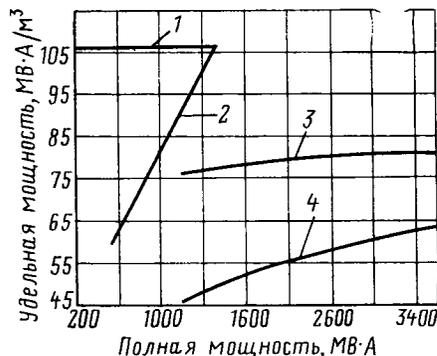


Рис. 5. Зависимость удельной массы от полной мощности:  
1— $2p=2$ ,  $f > 50$  Гц; 2— $2p=2$ ,  $f = 50$  Гц; 3— $2p=4$ ,  $f > 50$  Гц;  
4— $2p=4$ ,  $f = 50$  Гц

генераторов с изоляцией на большие номинальные напряжения при терморезистивной изоляции для работы в водородной среде в отечественной и зарубежной практике турбогенераторостроения.

В связи с ограничением роста номинального напряжения с повышением мощности происходит увеличение номинальных токов до нескольких десятков килоампер. Поэтому для снижения уровня вибрации стержней как в пазу, так и в лобовой части необходимо ограничение тока в стержне (объема тока в пазу). В данной работе это достигается применением несимметричных обмоток с числом параллельных ветвей большим, чем число полюсов.

Зависимость предельных мощностей турбогенераторов, рассчитанных с учетом вышеизложенных условий, от частоты представлена на рис. 3. Проведенные электромагнитные, тепловые расчеты и расчеты прочности и вибрации турбогенераторов предельных мощностей при повышенных значениях частоты тока статора с использованием существующих методик подтверждают надежность и работоспособность этих блоков.

С целью проведения сравнительного анализа показателей турбогенераторов с повышенной и промышленной частотами тока для мощностей, определенных как предельные для турбогенераторов с повышенной частотой, были рассчитаны оптимальные варианты турбогенераторов с частотой 50 Гц при равных электромагнитных нагрузках и ограничительных параметрах. Оптимальный вариант для каждой мощности определялся по минимуму приведенных затрат. Поиск оптимального варианта производился методом перебора вариантов. Хотя такой метод и громоздок, однако число рассматриваемых

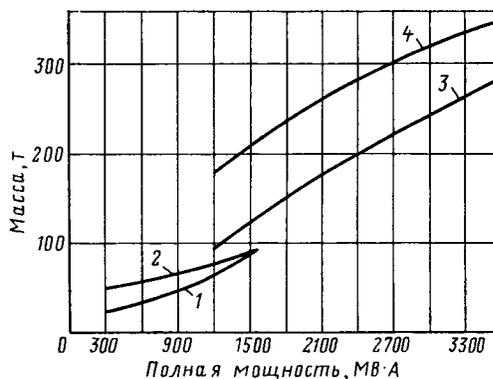


Рис. 6. Зависимость массы ротора от полной мощности:  
1— $2p=2$ ,  $f > 50$  Гц; 2— $2p=2$ ,  $f = 50$  Гц; 3— $2p=4$ ,  $f > 50$  Гц;  
4— $2p=4$ ,  $f = 50$  Гц

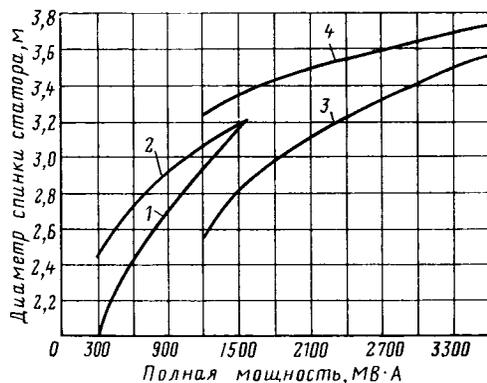


Рис. 7. Зависимость внешнего диаметра сердечника статора от полной мощности:

1— $2p=2$ ,  $f>50$  Гц; 2— $2p=2$ ,  $f=50$  Гц;  
3— $2p=4$ ,  $f>50$  Гц; 4— $2p=4$ ,  $f=50$  Гц

вариантов значительно снижается благодаря наличию эксплуатируемых и проектируемых турбогенераторов близких мощностей, для которых поиск оптимального варианта уже произведен.

Ниже приводятся результаты сравнительного анализа основных показателей турбогенераторов с повышенной частотой (до 100 Гц) и частотой 50 Гц. Одним из наиболее важных показателей является удельное использование активного объема турбогенератора. На рис. 4 представлены зависимости удельной мощности ( $P/D_1^2 l$ ) от полной мощности для двух- и четырехполюсных турбогенераторов. Турбогенераторы с повышенной частотой имеют значительно более высокое использование активного объема по расточке статора; даже при относительно небольшой единичной мощности использование остается высоким благодаря увеличению частоты.

В связи со значительным увеличением использования объема турбогенераторов с повышенной частотой существенно снижается расход активных и конструктивных материалов (рис. 5). Особое внимание следует обратить на значительно меньшие массы роторов турбогенераторов с повышенной частотой (рис. 6), что весьма важно для четырехполюсных турбогенераторов большей мощности, для изготовления которых требуются поковки огромной массы.

Уменьшение наружного диаметра сердечника статора (рис. 7) для турбогенераторов с повышенной частотой ведет к снижению их габаритов, что при создании блоков большой единичной мощности может сыграть значительную роль в решении проблемы их транспортировки.

На рис. 8 представлена зависимость к. п. д. турбогенераторов от полной мощности. Двухполюсные турбогенераторы с частотой 50 Гц имеют более высокое значение к. п. д. во всем интервале рассматриваемых мощностей. Четырехполюсные турбогенераторы мощностью 2500 МВт и более частотой 50 Гц имеют к. п. д. ниже чем турбогенераторы с повышенной частотой, что обусловлено необходимостью применения для них большего числа полых проводников по условиям охлаждения вследствие большой длины стержня (для снижения скорости воды и перепада давления на канале); из-за большого числа полых проводников значительно возрастают добавочные потери от поперечного пазового расстояния.

Анализ потерь в турбогенераторах показывает, что если суммарные потери в активных частях турбогенераторов с повышенной и промышленной частотами мало

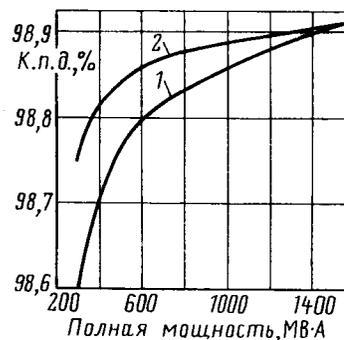


Рис. 8. Зависимость к. п. д. от полной мощности двухполюсных турбогенераторов:  
1 —  $f>50$  Гц; 2 —  $f=50$  Гц

отличаются (а в некоторых случаях они даже ниже для турбогенераторов с повышенной частотой), то удельные потери во всех активных частях более высоки для турбогенераторов с повышенной частотой. При применении непосредственного водяного охлаждения обмоток вследствие незначительного температурного перепада между охлаждающей жидкостью и поверхностью меди удельные потери в меди оказывают не столь большое влияние на параметры охлаждающего агента (скорость, расход, напор); решающее значение имеют суммарные потери, отводимые в охлаждающий канал, и гидравлические характеристики канала. В силу вышеизложенного, несмотря на более высокие удельные тепловыделения в обмотках турбогенераторов с повышенной частотой, применение для них водяного охлаждения обмоток не встречает принципиальных затруднений.

Следует отметить, что турбогенераторы с повышенной частотой имеют более высокий уровень индуктивных сопротивлений, однако в соответствии с принятыми основными положениями они не превышают значений, оговоренных в нормативной документации для турбогенераторов с частотой 50 Гц, изготавливаемых в настоящее время. Для турбогенераторов большой единичной мощности нормы отсутствуют, но существует тенденция к росту этих параметров.

В настоящее время для турбогенератора мощностью 1000 МВт, 1500 об/мин, 50 Гц с непосредственным водяным охлаждением обмотки ротора используется поковка ротора с диаметром бочки 1800 мм и ее длиной 6600 мм. При оговоренных выше условиях и применении водяного охлаждения обмотки ротора с использованием указанной поковки можно изготовить турбогенератор мощностью 1300 МВт при частоте 50 Гц.

Согласно рис. 1 по условиям прочности поковки с диаметром 1800 мм можно использовать для номинальной частоты вращения 2100 об/мин, что при четырехполюсном исполнении турбогенератора соответствует частоте тока 70 Гц. При электромагнитных нагрузках и ограничительных параметрах, принятых в данной работе, используя вышеуказанную поковку, можно изготовить турбогенератор мощностью около 1300 МВт.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулебакин В. С. Применение 100-периодного тока для электрификации СССР. — Электричество, 1933, № 5.
2. Лютер Р. А. К вопросу о переходе во вращающихся электрических машинах на частоту 100 Гц вместо 50 Гц. — Электричество, 1933, № 10.
3. Laithwaite E. Why do we use three-phase, 50 Hz? — Electrical Review, 1983, vol. 212, N 5.

4. Турбогенераторы. Расчет и конструкция / Г. В. Титов, Г. М. Хуторецкий, Г. А. Загородная и др. — Л.: Энергия, 1967.

5. Домбровский В. В., Хуторецкий Г. М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. — Л.: Энергия, 1974.

6. Глебов И. А., Бобков Ю. А., Дембо А. Р. О рациональных параметрах мощных четырехполюсных турбогенераторов. — Электротехника, 1971, № 7.

7. Электромагнитные процессы в торцевых частях электрических машин / А. И. Вольдек, Я. Б. Данилевич, В. И. Косачевский, В. Н. Яковлев. — Л.: Энергоиздат, 1983.

8. Счастливый Г. Г., Федоренко Г. М., Выговский В. И. Расчет нагрева и оценка потерь в крайних пакетах сердечника статора турбогенератора. — Электротехника, 1980, № 7.

[27.10.86]

УДК 621.313.13.024.014.4.001.24

## Электродинамические процессы в экранах многополюсной системы возбуждения сверхпроводникового двигателя постоянного тока

МИЛЫХ В. И., канд. техн. наук

Харьковский политехнический институт

В мощном СП-двигателе постоянного тока [1], имеющем многополюсную систему возбуждения с низкотемпературным охлаждением, используются индивидуальные полюсные криостаты. Каждый криостат представляет собой совокупность оболочек, включающих катушку обмотки возбуждения и вместе с ней охватывающих сердечник одного из главных полюсов [2].

В условиях эксплуатации при работе СП-двигателя с изменяющейся нагрузкой, например в реверсивном режиме на прокатном стане [3], оболочки криостатов будут подвержены воздействию переменного магнитного поля, обусловленного изменением тока нагрузки. Проведенный анализ показал [4], что вихревые токи в оболочках, выполненных из материала с относительно высоким удельным электросопротивлением, характерным для нержавеющей стали, достаточно малы и не приводят к проблемам эксплуатации системы возбуждения. В то же время установлено [5], что при использовании для оболочки меди вихревые токи могут достигать весьма существенного значения и создавать тем самым серьезные проблемы. Такая медная оболочка традиционно выполняет роль теплоизолирующего экрана и располагается в вакуумном промежутке, разделяющем зоны сверхнизкой и нормальной температур; последнюю имеет наружная оболочка — кожух криостата, контактирующая с окружающей средой [1, 2].

Однако оценка, проведенная в [5], привела к получению данных, которые в первом приближении лишь выявили уровень проблемы, но не были достаточными по точности для принятия конкретных инженерных решений. Дело в том, что эта оценка сделана расчетом вихревых токов без учета их реакции на возбуждающее переменное магнитное поле. Использование методики с таким допущением оказывается надежным, например, в упомянутом случае [4] при выполнении оболочек криостата из материала с достаточно высоким удельным электросопротивлением.

В статье приводится решение задачи электродинамических процессов, возникающих в медных экранах полюсных криостатов при нестационарном режиме работы СП-двигателя, а также делается анализ этих процессов с учетом реакции вихревых токов.

Расчетная схема десятиполюсной магнитной системы СП-двигателя, сложившейся в процессе проектирова-

ния [1, 6], представлена на рис. 1 сектором, очерчивающим участок между осями симметрии соседних главных полюсов. Из всех оболочек криостата показаны только сечения двух экранов — по одной из сторон каждого в междуполюсном пространстве. Остальные оболочки из рассмотрения исключены, так как они выполняются из нержавеющей стали с относительно высоким удельным сопротивлением [2], вследствие чего их вихревые токи, а также реакция на возбуждающее поле достаточно малы [4] и не могут существенно влиять на процессы в медных экранах. Из особенностей экранов отметим, что в одной из торцевых зон каждого предполагается разрез, исключающий возникновение токов, замыкающихся по

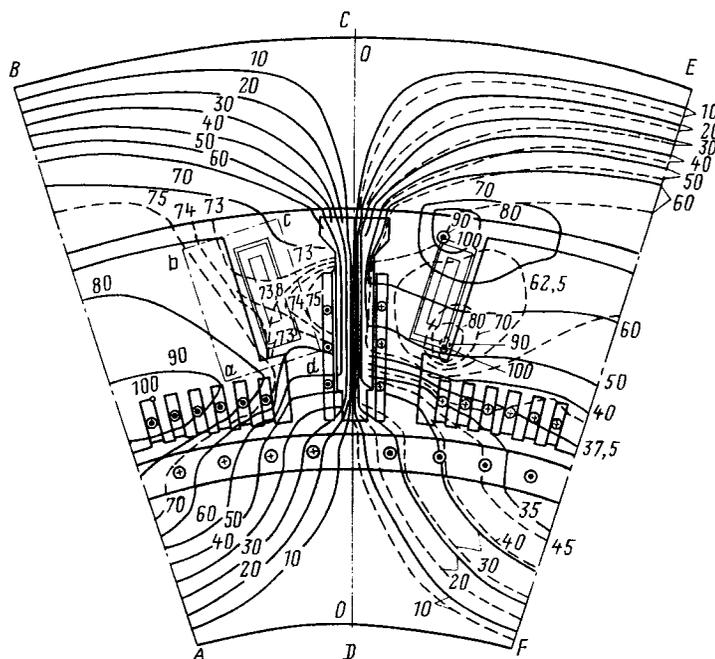


Рис. 1. Схема магнитной системы криодвигателя с картинками магнитных полей: на левой половине — для обмоток якорной цепи; на правой половине — для элементарных проводников экрана, имеющих номера 1 и 20 (линии векторного потенциала, соответственно пунктирные и сплошные); на линиях значения А — в процентах максимального значения в конкретном варианте расчета

периметру охвата сердечников главных полюсов, — это сделано по причинам, изложенным в [2].

Трудоемкость решения поставленной задачи сопряжена прежде всего со сложностью геометрии магнитной системы криодвигателя, а также со сложностью предполагаемой временной функции изменения тока его нагрузки, которая представлялась уже в [4, 5]. Поэтому наиболее совершенный подход — решение непосредственно системы уравнений Максвелла в их исходном виде — не представляется возможным. Решение достигается на основе следующих допущений.

Возбуждающее магнитное поле и поле реакции токов экранов будем считать плоскопараллельными, основываясь, как и ранее [4—6], на реально существующих размерных соотношениях магнитной системы СП-двигателя; например, осевая длина магнитопровода составляет 1,3 м, а основной немагнитный зазор — 0,075 м. Возможная погрешность из-за наличия значительных немагнитных зазоров и неодинаковых осевых длин сердечников будет компенсироваться посредством приближенного учета торцевого эффекта на основе методики [7].

Учитывая на соответствующих этапах расчета основное насыщение магнитной системы постоянным полем возбуждения, будем все же считать, что при изменении нагрузки магнитное состояние магнитопровода СП-двигателя сохраняется неизменным. Это возможно из-за того, что, во-первых, обмотки якоря (компенсационная и дополнительных полюсов) имеют существенно меньшую результирующую м. д. с., чем обмотка главных полюсов [6], и, следовательно, практически не влияют на насыщение магнитной цепи главных полюсов; во-вторых, изменение насыщения магнитной цепи дополнительных полюсов (значительно менее насыщенных, чем главные полюса) практически слабо влияет на магнитное поле рассеяния в междуполюсном пространстве, образующем большой немагнитный промежуток. В результате оказывается возможным рассмотрение переменных полей обособленно от постоянного поля возбуждения, что соответствует введенному в [6] косвенному расчетному режиму, и, кроме того, использование симметрии магнитной системы с шагом в половину полюсного деления относительно осей главных и дополнительных полюсов.

Принятое допущение о плоскопараллельности поля устанавливает, что в обмотках, а также в экранах будут существовать только осевые составляющие тока. Для обмоток это вполне естественно в пределах протяженности сердечников, а для экрана подтверждается анализом вихревых токов (хотя и без учета их реакции), проведенным с учетом торцевых частей оболочек криостата [4, 5].

Предположение об осевой направленности токов экрана позволяет условно разбить его сечение на  $n$  самостоятельных элементарных проводников достаточно малого сечения, в пределах каждого из которых плотность тока можно считать постоянной. В итоге решаемую задачу можно свести к расчету процессов в совокупности электрических контуров. При этом в силу симметрии можно ограничиться рассмотрением контуров в пределах одного полюсного деления, определив их индуктивные параметры на половине полюсного деления с учетом  $n$  одноименных  $n$  контуров  $n$  полюсов.

Симметрия электромагнитной системы СП-двигателя, включая магнитопровод, обмотки и экраны, приводит к возникновению токов в экранах симметрично осям главных полюсов и асимметрично осям дополнительных полюсов. Симметрия приводит к тому, что отсутствуют кон-

туры замыкания токов по периметру охвата сердечников главных полюсов, следовательно, в пределах сечения каждой боковой стороны экрана для токов выделенных элементарных проводников должно выполняться условие

$$\sum_{p=1}^n i_p = 0. \quad (1)$$

К этому же само по себе приводило бы наличие упомянутых разрезов в экранах. Фактически токи локализируются в пределах каждой из боковых сторон экранов, перетекая от одного условного проводника к другому по ограниченному участкам торцевых частей экранов.

Асимметрия позволяет условно объединить попарно элементарные проводники сторон двух соседних экранов, расположенных по обе стороны дополнительного полюса, объединить в элементарные контуры, охватывающие эти полюсы. Так получается совокупность контуров, соосных в магнитном отношении полюсным контурам обмоток якорей цепи, что облегчает задачу расчета их взаимдуктивных параметров. Введение условных составных контуров экранов не меняет физической сущности задачи, зафиксированной условием (1), но, делая контуры замкнутыми, позволяет составить по обычным правилам [8] систему дифференциальных уравнений

$$\sum_{p=0}^n M_{kp} \frac{di_p}{dt} + R_k i_k = 0 \quad (k=1, 2, \dots, n), \quad (2)$$

где  $M$  — коэффициенты самоиндукции (при  $k=p$ ) и взаиминдукции (при  $k \neq p$ );  $t$  — время;  $R$  — активное сопротивление.

Здесь индекс  $p=0$  относится к параметрам цепи тока нагрузки, а уравнение для этой цепи имеет вид

$$M_{00} \frac{di_0}{dt} + \sum_{p=1}^n M_{0p} \frac{di_p}{dt} + R_0 i_0 = u_0 + e_0, \quad (3)$$

где  $u_0$  — напряжение питающей сети;  $e_0$  — э. д. с. вращения в обмотке якоря.

Рассматривая размеры поперечного сечения экранов (рис. 1) и учитывая условие (1), можно прийти к выводу, что члены уравнения (3), объединенные в сумму, должны быть пренебрежительно малы по сравнению с другими членами этого уравнения, т. е. влияние реакции вихревых токов экрана на цепь тока нагрузки несущественно и функция этого тока  $i_0(t)$  может быть в принципе получена обособленным от системы уравнений (2) решением уравнения (3). Однако представляется практически более целесообразным непосредственное задание функции  $i_0(t)$  по опыту эксплуатации прокатных двигателей, чем задание еще более неопределенных функций  $e_0(t)$  и  $u_0(t)$ , так же как и  $i_0(t)$ , целиком зависящих от конкретного режима и условий эксплуатации СП-двигателя. Таким образом, в решаемой задаче будем считать функцию  $i_0(t)$  заданной внешними условиями и известной, поэтому система уравнений (2), в которой учитывается реакция вихревых токов с точки зрения их влияния на самих себя, но не на ток якорной цепи, будет рассматриваться изолированно от уравнения (3) и может быть представлена с вынесением возбуждающих факторов в правые части:

$$\sum_{p=1}^n M_{kp} \frac{di_p}{dt} + R_k i_k = -M_{k0} \frac{di_0}{dt} \quad (k=1, 2, \dots, n). \quad (4)$$

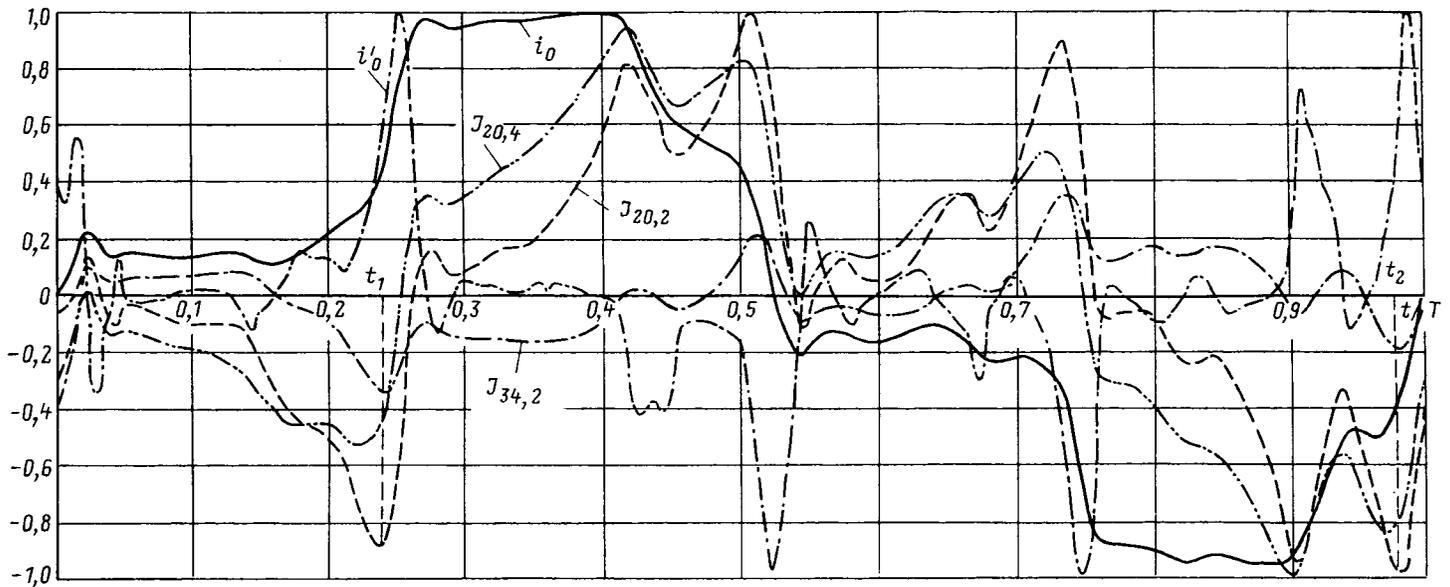


Рис. 2. Временные функции тока нагрузки  $i_0$  и ее производная  $i'_0$ , а также функции плотности тока в определенных участках сечения экрана ( $J_{20,2}$ ,  $J_{34,2}$  и  $J_{20,4}$ ) для конкретных расчетных вариантов

Неотъемлемой частью этой системы уравнений является уравнение (1), и эта полная система оказывается переопределенной, так как число уравнений  $(n+1)$  больше числа неизвестных  $n$ .

Устраняя переопределенность, но сохраняя вносимые каждым контуром взаимосвязи, вычтем из каждого уравнения системы (4) следующее за ним уравнение и исключим из системы последнее уравнение. В результате получается совокупность уравнений

$$\sum_{p=1}^n (M_{kp} - M_{k+1,p}) \frac{di_p}{dt} + R_k i_k - R_{k+1} i_{k+1} = (M_{k+1,0} - M_{k0}) \frac{di_0}{dt} \quad (k = 1, 2, \dots, n-1), \quad (5)$$

которая вместе с уравнением (1) образует подлежащую решению систему. Основными этапами, предшествующими непосредственно решению системы дифференциальных уравнений, должны быть задание функции  $i_0(t)$  и определение коэффициентов  $M$  и  $R$ .

Функция тока нагрузки  $i_0(t)$  целиком определяется конкретным режимом работы СП-двигателя и не является стабильной. Достоверно она может быть определена, например, осциллографированием в процессе эксплуатации двигателя, а на этапе расчетного исследования будет принята, как и ранее [4, 5], ориентировочно по подобию с аналогичной функцией, полученной на двигателе, работающем на реверсивном прокатном стане. Принятая функция  $i_0(t)$  представлена на рис. 2 в пределах периода полного реверса, соответствующего прямому и обратному проходам слитка. Функция выражена в относительных единицах, причем за базу принято максимальное значение тока: применительно к СП-двигателю — это допустимое по техническим условиям 2,5-кратное по отношению к номинальному значению тока. Во времени эта функция считается повторяющейся с периодом  $T=4,5$  с.

Графически заданную функцию  $i_0(t)$  разложим в гармонический ряд Фурье [8], отбросив постоянную составляющую, не вносящую вклад в создание токов

экранов, и представим как

$$i_0 = k_I I_{\text{ном}} \sum_{l=1}^q I_{m0l} \sin(\omega t + \psi_{0l}), \quad (6)$$

где  $k_I$  — кратность тока перегрузки;  $I_{\text{ном}}$  — номинальный ток нагрузки;  $q$  — число учитываемых гармоник;  $I_{m0}$  — амплитуды гармонического спектра для функции (отн. ед.);  $\psi_0$  — начальные фазы;  $\omega$  — угловая частота.

Подставив функцию (6) в систему уравнений (5), получим

$$\sum_{p=1}^n (M_{kp} - M_{k+1,p}) \frac{di_p}{dt} + R_k i_k - R_{k+1} i_{k+1} = k_I I_{\text{ном}} \omega (M_{k+1,0} - M_{k0}) \sum_{l=1}^q I_{m0l} \cos(\omega t + \psi_{0l}) \quad (k = 1, 2, \dots, n-1). \quad (7)$$

В условиях принятых допущений возможно применение метода наложения, и тогда с учетом разложения правых частей системы (7) ее решение должно иметь вид гармонического ряда:

$$i_k = \sum_{l=1}^q I_{mkl} \sin(\omega t + \psi_{kl}), \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

вследствие чего система уравнений (7) трансформируется в  $q$  систем:

$$\omega l \sum_{p=1}^n (M_{kp} - M_{k+1,p}) I_{mpl} \cos(\omega t + \psi_{pl}) + R_k I_{mkl} \sin(\omega t + \psi_{kl}) - R_{k+1} I_{m, k+1, l} \sin(\omega t + \psi_{k+1, l}) = k_I I_{\text{ном}} l \omega (M_{k+1,0} - M_{k,0}) I_{m0l} \cos(\omega t + \psi_{0l}), \quad k = 1, 2, \dots, n-1, \quad (9)$$

каждая из которых соответствует определенной гармонике с номером  $l$ .

Так как все члены уравнений являются гармоническими функциями, то при решении удобно перейти к системе алгебраических уравнений для комплексных

значений токов каждой из гармоник

$$j\omega l \sum_{p=1}^n I_{mpl} (M_{k,p} - M_{k+1,p}) + R_k I_{mkl} - R_{k+1} I_{m, k+1, l} = jk I_{ном} l \omega I_{m0l} (M_{k+1,0} - M_{k,0}), \quad k=1, 2, \dots, n-1, \quad (10)$$

дополнив ее на основе (1) уравнением

$$\sum_{p=1}^n I_{mpl} = 0. \quad (11)$$

Здесь  $I_{mpl} = I_{mpl} e^{j\psi pl}$ ,  $I_{m0l} = I_{m0l} e^{j\psi 0l}$ ,  $j = \sqrt{-1}$ .

Определение индуктивных параметров контуров проводилось конкретно в полевой постановке численным методом на ЦВМ, магнитное поле рассчитывалось методом конечных разностей [9]. Исходное уравнение

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( v \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{v}{r} \left( \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( v \frac{\partial A}{\partial \varphi} \right) = -J, \quad (12)$$

где  $J$ ,  $A$  — осевые составляющие плотности тока и векторного магнитного потенциала;  $v$  — удельное магнитное сопротивление;  $r$  и  $\varphi$  — полярные координаты, описывающее распределение поля в поперечном сечении двигателя, заменялось системой алгебраических конечно-разностных уравнений и решалось по алгоритму [9] с усовершенствованием [7], позволяющим приближенно учитывать торцевой эффект.

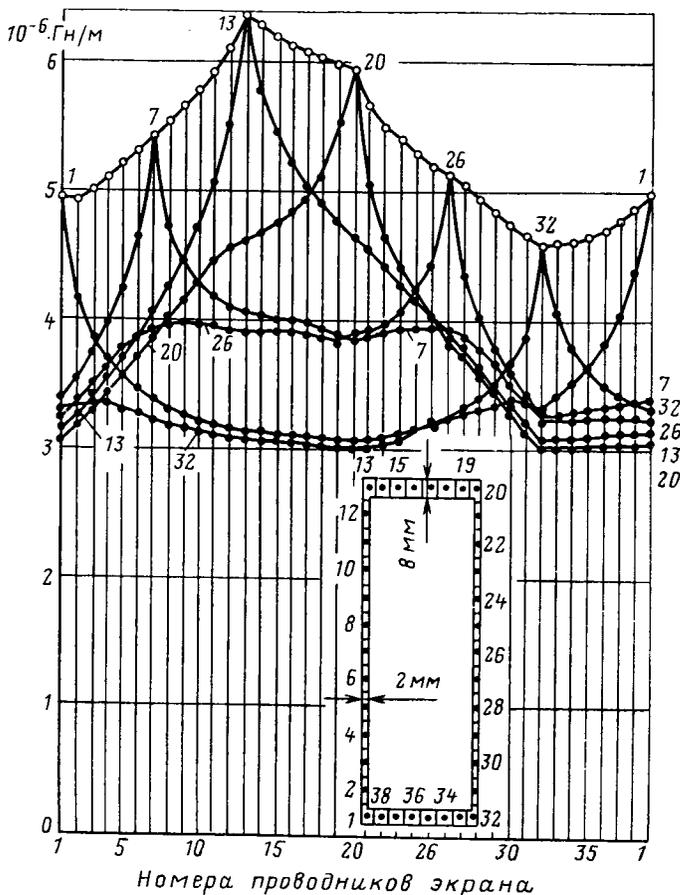


Рис. 3. Разбиение сечения экрана на элементарные проводники и их индуктивные параметры: пунктиром соединены точки, соответствующие собственным индуктивностям; сплошными линиями — взаимным индуктивностям некоторых (1, 7, 13, 20, 26 и 32) проводников

Прежде всего было определено состояние магнитной системы — распределение  $v(r, \varphi)$ , для чего на половине полюсного деления был проведен расчет поля возбуждения в известном режиме холостого хода [6, 9]. На фоне установленного распределения  $v(r, \varphi)$  проводились последующие расчеты полей обмоток якорной цепи и контуров экранов, что соответствует введенному в [6] косвенному режиму.

Расчет поля обмоток якорной цепи проведен также на половине полюсного деления  $ABCD$  (рис. 1) при использовании полярной сетки и соответствующих косвенному режиму граничных условий [6]:

$$(A)_{BCDA} = 0; \quad (\partial A / \partial \varphi)_{AB} = 0.$$

Затем из этой области расчета выделялась прямоугольная подобласть (показана на рис. 1 —  $abcd$ ), где использовалась прямоугольная сетка, хорошо согласующаяся с геометрией сечения экрана, и проводился дорасчет поля по принципу фрагментирования, применяемому в [4—6].

По распределению  $A$ , картина которого показана на рис. 1, определялись коэффициенты взаимной индукции обмоток якорной цепи с элементарными проводниками экрана, что делалось по аналогии с [2]:

$$M_{0k} = \frac{2A_k}{I_{ном}}, \quad k=1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

где  $A_k$  — среднее значение потенциала в пределах сечения  $k$ -го проводника; удвоение здесь и в других случаях проводится для учета двух сторон контура, а полученные значения приходятся на единицу осевой длины двигателя.

Отметим, что расчет поля проведен при номинальном токе нагрузки, как это и учтено в формуле (13).

Параметры элементарных проводников экрана определялись поочередными расчетами их магнитных полей. Так как эти поля подчиняются той же симметрии, что и поле обмоток якорной цепи, то порядок расчетов аналогичный. При этом в конкретном проводнике с номером  $p$  задавался единичный ток, и после получения распределения  $A$ , которое для примера показано на рис. 1, определялись коэффициенты

$$M_{kp} = 2A_k, \quad k=1, 2, \dots, n. \quad (14)$$

Конкретно сечение экрана заменялось 38 элементарными проводниками — значение  $n$ , и их индуктивные параметры частично продемонстрированы на рис. 3. Здесь же показано распределение элементарных проводников применительно к сечению экрана, располагавшемуся на левой половине рис. 1.

По известным сечениям проводников  $S$  и удельному электросопротивлению материала  $\rho$  определяются значения

$$R_k = 2\rho / S_k, \quad k=1, 2, \dots, n. \quad (15)$$

Полученных по формулам (13), (14) и (15) значений достаточно для решения системы уравнений (10), (11). При этом очевидно, что лобовые части контуров не учитываются вполне оправданно, так как по условию (1) токи в этих частях практически отсутствуют, замыкаясь на ограниченных участках торцевых зон экранов.

Касааясь технологии конкретных расчетов токов экранов, отметим следующее.

Функция  $i_0(t)$  (рис. 2) по равномерному разбиению оси  $t$  на 240 интервалов была разложена на 120 гармоник — значение  $q$ . Поочередное решение системы (10), (11) для каждой из гармоник проведено на ЦВМ с использованием стандартных программ решения систем линейных алгебраических уравнений с комплексной матрицей [10].

В результате решения по комплексным значениям токов отдельных временных гармоник получены функции токов [8], а по ним — плотности тока в элементарных проводниках сечения экрана:

$$J_k = \frac{1}{S_k} \sum_{l=1}^q I_{mkl} \sin(\omega t + \psi_{pl}), \quad k=1, 2, \dots, n. \quad (16)$$

По гармоническим коэффициентам получены действующие значения плотности тока [8]

$$J_{dk} = \frac{1}{\sqrt{2} S_k} \sqrt{\sum_{l=1}^q I_{mkl}^2}, \quad k=1, 2, \dots, n \quad (17)$$

и мощность тепловыделений на единицу длины экрана

$$P = 2\rho \sum_{k=1}^n J_{dk}^2 S_k. \quad (18)$$

Приступая к конкретному анализу электродинамических процессов, отметим, что расчеты проведены для четырех значений  $\rho$ :  $1,3 \cdot 10^{-9}$ ;  $0,65 \cdot 10^{-9}$ ;  $0,325 \cdot 10^{-9}$  и  $0,1625 \cdot 10^{-9}$  Ом·м. Эти значения охватывают диапазон, характерный для технических марок меди МО и М1 (отожженной и неотожженной) в возможном интервале установившихся температур экрана (20—60) К. Наиболее вероятным и основным считается второе из упомянутых значений  $\rho$ .

Для этого значения  $\rho$  на рис. 4 показана векторная диаграмма для первой гармоники плотности тока избранных десяти элементарных проводников экрана. Очевидный разброс фазовых сдвигов свидетельствует о явно выраженной реакции экранных токов уже на частоте названной гармоники. Отметим, что при неучете реакции векторы должны иметь лишь два противофазных направления, совпадающих на рис. 4 с проведенной штрихпунктирной линией.

Амплитуды гармонических составляющих токов элементов экранов имеют весьма широкий и скачкообразный спектр, но с явной общей тенденцией снижения с ростом номера гармоники. Например, в диапазоне 100—120 гармоник амплитуды их уже уменьшены в 500—1000 раз по сравнению с показанными на рис. 4 значениями.

На рис. 2 в сопоставлении с функциями  $i_0(t)$  и ее

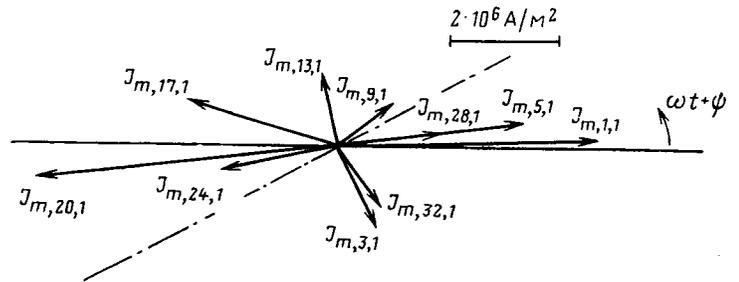


Рис. 4. Векторная диаграмма плотностей тока первой временной гармоники для избранных элементарных проводников экрана: 1, 5, 9, 13, 17, 20, 24, 28, 32

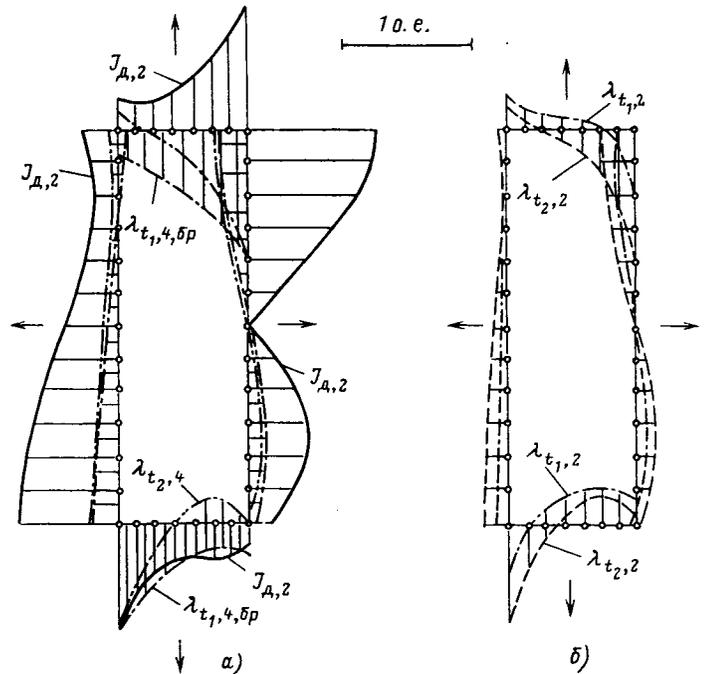


Рис. 5. Распределение действующего значения плотности тока  $J_d$  и мгновенных значений линейной плотности тока  $\lambda$  по периметру сечения экрана для определенных временных интервалов и расчетных вариантов

производной  $i'_0(t)$ , представленной также в относительных единицах с максимумом, равным единице, показаны еще функции  $J(t)$ , полученные по формуле (16). Они выражены в соответствующих относительных единицах. Функции  $J_{20,2}(t)$  и  $J_{34,2}(t)$  принадлежат элементарным проводникам с номерами 20 и 34 для случая  $\rho=0,65 \times 10^{-9}$  Ом·м при базовом значении  $(J_{20,2})_{max}=1,21 \times 10^7$  А/м<sup>2</sup>, функция  $J_{20,4}(t)$  — проводнику с номером 20 для случая  $\rho=0,1625 \cdot 10^{-9}$  Ом·м при базовом значении  $(J_{20,4})_{max}=2,42 \cdot 10^7$  А/м<sup>2</sup>. Базовые значения являются максимальными значениями за весь период в пределах всего экрана для конкретного значения  $\rho$ .

Если бы реакция экранных токов не учитывалась, то функция  $J(t)$  при всех значениях  $\rho$  и для всех элементов экрана по характеру полностью совпала бы с функцией  $i'_0(t)$ . Поэтому, проводя сравнение временных функций, отметим существенное влияние реакции экранных токов, выражающееся в «расплывчатости» приведенных на рис. 2 функций  $J(t)$ . Хотя все эти функции и оказываются «ведомыми» функцией  $i'_0(t)$ , но их подобие уменьшается с уменьшением значения  $\rho$ .

Варианты распределения тока по периметру сечения экрана показаны на рис. 5 с представлением каждого из них в соответствующих относительных единицах.

Вариант	Параметр				
	Ом · м × 10 <sup>9</sup>	P <sub>1</sub> , Вт/м	P, Вт/м	P/P <sub>1</sub>	(ΣI) <sub>m</sub> , кА
С учетом реакции экранных токов	1,30	6,51	13,65	2,10	2,59
	0,65	9,65	17,09	1,77	3,65
	0,325	11,99	18,77	1,57	4,83
	0,1625	13,72	18,84	1,37	6,21
Без учета реакции экранных токов	0,65	15,23	75,14	4,93	14,77

Здесь наряду с действующим значением плотности тока  $J_d$  присутствуют мгновенные значения линейной плотности тока  $\lambda$  для отмеченных на рис. 2 моментов времени  $t_1$  и  $t_2$ , что отражено соответствующими индексами при  $\lambda$ . Второй — цифровой индекс — указывает на принадлежность варианта конкретному значению  $\rho$ , а именно, «2» соответствует  $\rho = 0,65 \cdot 10^{-9}$  Ом·м, «4» —  $\rho = 0,1625 \cdot 10^{-9}$  Ом·м. Обозначение «бр» указывает на то, что данный вариант рассчитан без учета реакции экранных токов. Базовым значением для  $J_d$  является  $5,66 \times 10^6$  А/м<sup>2</sup>, для  $\lambda_{t 1,2}$  и  $\lambda_{t 2,2}$  —  $9,7 \cdot 10^4$  А/м, для  $\lambda_{t 2,4}$  —  $15,4 \cdot 10^4$  А/м, для  $\lambda_{t 1,4 \text{ бр}}$  —  $12 \cdot 10^5$  А/м.

Для лучшего восприятия графического материала рис. 5 разделен на части *a* и *b*; он показывает существенную зависимость распределений плотности тока от варьируемых параметров.

Некоторые интегральные параметры приведены в таблице.

Здесь мощность тепловыделений (на единицу длины экрана)  $P_1$  соответствует первой временной гармонике тока;  $P$  — с учетом полного спектра гармоник. Величина  $(\Sigma I)_m$  — максимальное значение одностороннего тока — сумма токов, имеющих одинаковый знак в данный момент времени.

Очевидно, из-за реакции экранных токов потери мощности существенно снижены. В определенном возможном диапазоне значений  $\rho$  при их уменьшении потери возрастают, но с явно замедляющимся темпом и с уменьшением доли, вносимой высшими гармоническими составляющими. Так как наиболее вероятное значение  $\rho$  находится на участке возрастания потерь, то для уменьшения тепловыделения возможно искусственное увеличение сопротивления экранным токам посредством создания малопротяженных барьеров, прерывающих их контуры.

Теплоизолирующие свойства экрана не ухудшатся, если экран останется медным и теплоотвод будет организован по направлениям, перпендикулярным контурам экранных токов. При этом, безусловно, придется идти на компромисс между стремлением уменьшить потери в экране и электродинамические усилия, действующие на него, и стремлением защитить зоны сверхнизких температур от действия переменного магнитного поля, также приводящего к тепловыделениям уже непосредственно в этой зоне. Критерием оптимизации здесь может быть обеспечение наибольшей устойчивости криогенной системы возбуждения при одновременной минимизации расхода хладагента; в итоге необходимо стремиться к наиболее экономичной и надежной работе СП-двигателя и рабочего механизма в целом.

**Выводы.** 1. Реакция экранных токов оказывает определяющее влияние на электродинамические процессы

в экранах системы возбуждения СП-двигателя, что проявляется и во временных функциях, и в координатных распределениях названных токов.

2. Предполагаемое значение удельного электрического сопротивления меди экранов находится в пределах диапазона, характеризующегося возрастанием тепловыделений с уменьшением этого сопротивления, поэтому представляется целесообразным искусственное увеличение сопротивления экранным токам, но без ухудшения теплоизолирующих свойств системы экранирования. Это возможно, например, при использовании медных оболочек с анизотропной структурой, имеющих большое сопротивление в направлении замыкания токов (вдоль боковых сторон экрана) и малое сопротивление в направлении теплоотвода (поперек боковых сторон экрана).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные направления разработки и исследований криодвигателя мощностью 10 МВт/Н. Г. Гринченко, В. Г. Данько, В. С. Кильдишев и др. — В кн.: Сверхпроводимость в технике. Труды Второй Всесоюзной конф. по техническому использованию сверхпроводимости. Т. 1. Сверхпроводниковые машины и устройства. Магнитные системы. — Л.: ЛНИВЦ, 1984.
2. Милых В. И. Вывод энергии из сверхпроводящей системы возбуждения двигателя постоянного тока. — Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1984, № 4.
3. Сверхпроводимость в электрических машинах мощных систем электропривода/Н. Шереметьевский, В. Данько, В. Калашников и др. — В кн.: Техническая сверхпроводимость в электроэнергетике и электротехнике. — М.: Секретариат СЭВ, 1982.
4. Данько В. Г., Милых В. И., Станкевич А. И. Вихревые токи в низкотемпературной зоне криостата в криодвигателе постоянного тока. — Электричество, 1982, № 11.
5. Данько В. Г., Милых В. И., Станкевич А. И. Анализ проблемы потерь на вихревые токи в криостате мощного криодвигателя постоянного тока при работе в реверсивном режиме. — *Nadprzewodnikowe maszyny elektryczne. Czesc II, Wroclaw, 11—13 czerwca 1981, Prace naukowe politechniki wroclawskiej, N 36. Conferences, N 9, 1982, s. 32—44.*
6. Данько В. Г., Милых В. И. Электродинамические усилия в электродвигателе с обмоткой якоря, вынесенной в зазор, и компенсационной обмоткой. — Электротехника, 1982, № 1.
7. Милых В. И. Расчет электромагнитного поля в поперечном сечении электрических машин. — Электротехника, 1982, № 12.
8. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. — М.: Высшая школа, 1973.
9. Erdelyi E. A., Fuchs E. F. Nonlinear magnetic field analysis of DC machines. Part I. Theoretical fundamentals. Part II. Application of the improved treatment. — IEEE PAS, 1970, vol. 89, N 7.
10. Математическое обеспечение ЕС ЭВМ. Библиотека программ по численным методам на языке ПЛ/1/В. О. Круглов, К. В. Маслов, А. А. Моторная и др. — Харьков: ФТИИТ АН УССР, 1984.

[11.03.86]

# Исследование влияния термокриоциклических воздействий на электрическую прочность полимеров

КАНИСКИН В. А., СЕРЕДА Г. Г., РУМЯНЦЕВ Д. Д., ХРЕНКОВ Н. Н.

Криогенные устройства во время эксплуатации подвергаются циклическим воздействиям различных температур: в период выхода на рабочий режим, при профилактических осмотрах и ремонтах температура устройства циклически меняется от нормальной до криогенных. Некоторые криогенные электротехнические устройства должны интенсивно входить в рабочий режим, а после кратковременной работы они нагреваются до нормальных температур. В таких условиях весьма актуальным является выяснение влияния термокриоциклических воздействий на электрическую прочность изоляции и в первую очередь на полимерные диэлектрики, которые являются наиболее перспективными для этих целей [1—2].

Исследования показали, что термокриоциклические воздействия приводят к снижению электрической прочности полимерной изоляции. Это наблюдалось как у эмалированных проводов, покрытых полимерными лаками [3, 4], так и у отдельных полимерных пленок [5, 6]. Считается, что главной причиной этого явления являются механические напряжения, возникающие в полимерной изоляции из-за разной величины термического сжатия электрической изоляции и токопроводящей жилы при охлаждении электротехнического устройства от комнатной температуры до криогенной. Например, при охлаждении от 300 до 4 К термическое сжатие материала составляет от 0,15 до 0,4 % для металлов и сверхпроводников и от 1,4 до 2,4 % для полимеров. Кроме этого, при охлаждении устройств до криогенных температур полимерные материалы проходят через температуру стеклования, что может привести к внутренним механическим напряжениям и образованию микродефектов в полимерной изоляции. Поэтому исследование влияния термокриоциклических воздействий на электрическую прочность изоляции криогенных устройств и выяснение физических явлений, лежащих в основе их, является необходимым условием для выработки научно обоснованных методов расчета конструкций на надежность.

**Методика проведения экспериментов.** Для исследований выбрана фторлоновая пленка Ф-4 толщиной 10 мкм (ГОСТ 51079—71) и полиэтиленовая пленка (ПЭ) высокой плотности (ГОСТ 16338—70) толщиной 40 мкм. Перед испытаниями пленку выдерживали трое суток в эксикаторе с силикагелем для исключения влияния влаги, а затем наматывали без натяжения на полую полированную оправку из латуни диаметром 18 мм кусок пленки длиной 3—4 м. Толщина намотки составляла 0,5 мм для Ф-4 и 2—3 мм — для ПЭ. Для фиксации наружного конца испытуемой пленки производилась подмотка 5—6 витков отдельного куска пленки. Это позволило имитировать намотанную из лент электрическую изоляцию криогенного кабеля.

Испытательную ячейку с оправками, установленными вертикально, помещали попеременно в сосуд Дьюара с жидким азотом или в термостат с повышенной температурой. Один цикл температурного воздействия длительностью 30 мин включал в себя выдержку испытательной ячейки с пленками в течение 15 мин в среде жидкого азота при температуре 77 К и 15 мин в термостате при повышенной температуре. Температура термостатов для разных партий образцов поддерживалась постоянной с точностью до  $\pm 3$  К и была для Ф-4 равна 473 К, 443 К

и 413 К, а для ПЭ соответственно 358 К и 338 К. Значительный температурный перепад при этих испытаниях был выбран заведомо жестким для того, чтобы выявить изменения электрической прочности полимеров при термокриоциклических воздействиях.

Влияние термокриоциклических воздействий на полимерные пленки оценивали по величине кратковременной и длительной электрической прочности в среде жидкого азота, определяемой между плоскими электродами: верхним высоковольтным диаметром 25 мм и нижним заземленным диаметром 50 мм при 50 Гц, как описано в [6]. При определении кратковременной электрической прочности каждая партия образцов состояла из 50 образцов, а при длительной — не менее чем из 20 образцов.

Изменение структуры полимеров оценивали по изменению инфракрасных спектров до и после термокриоциклических воздействий, полученных с помощью двухлучевого инфракрасного спектрофотометра типа ИКС-22.

**Анализ полученных результатов.** Анализ функций распределения пробивных напряжений полимера в среде жидкого азота после действия термокриоциклических воздействий показал, что максимальные значения  $U_{пр}$  в выборке остаются на уровне исходной пленки (рис. 1). Увеличение количества термокриоциклических воздействий приводит к появлению слабых мест, увеличению количества минимальных (пониженной величины) значений  $E_{пр}$  и, как следствие этого, к снижению  $E_{пр,ср}$  и увеличению среднеквадратического отклонения  $S$  (табл. 1 и 2).

Более существенное снижение электрической прочности наблюдается при малых вероятностях пробоя. Визуальное исследование пленки Ф-4 после термокриоциклических воздействий показало наличие отдельных областей с микротрещинами, которые можно было заметить из-за различного преломления падающего света. С ростом количества циклов размеры этих областей с де-

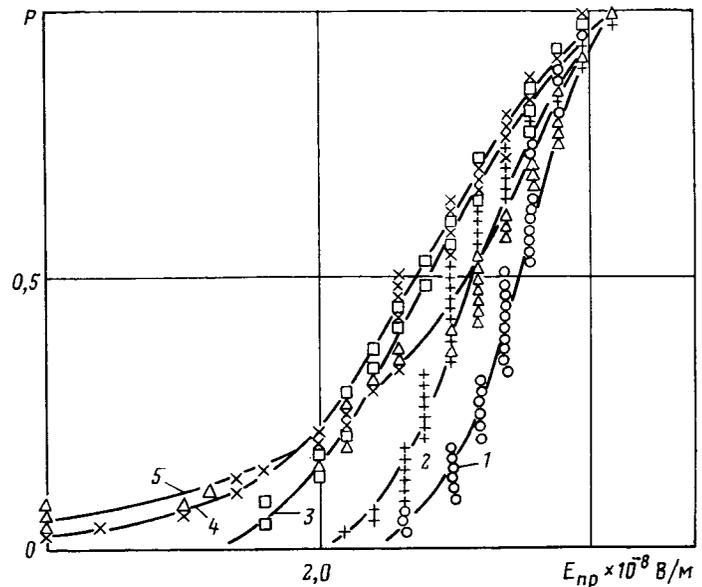


Рис. 1. Зависимость  $P=\Phi(E_{пр})$  для Ф-4 в жидком азоте и температурного режима (77—473) К; исходное состояние (1) и после 25 (2), 75 (3), 125 (4) и 175 (5) циклов

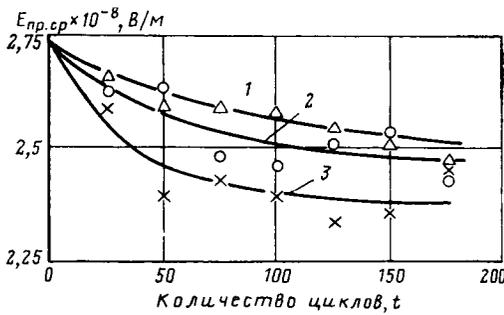


Рис. 2. Зависимость  $E_{пр.ср} = \Phi(t)$  для Ф-4 в жидком азоте и температурных режимов (77—413) К (1), (77—443) К (2) и (77—473) К (3)

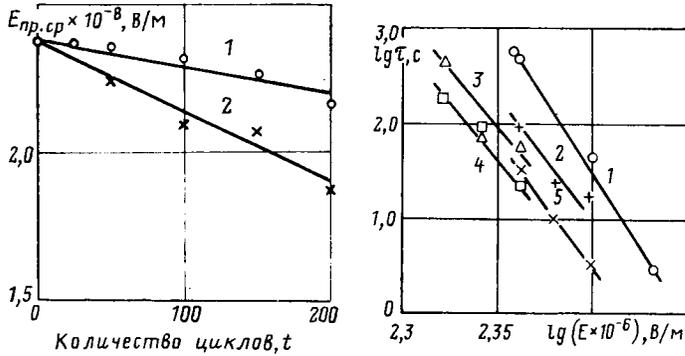


Рис. 3. Зависимости  $E_{пр.ср} = \Phi(t)$  для ПЭ в жидком азоте и температурных режимов (77—358) К (1) и (77—338) К (2)

Рис. 4. Зависимости  $lg \tau = \Phi(lg E)$  для Ф-4 в жидком азоте и температурного режима (77—473) К; исходное состояние (1) и после 50 (2), 100 (3), 150 (4) и 175 (5) циклов

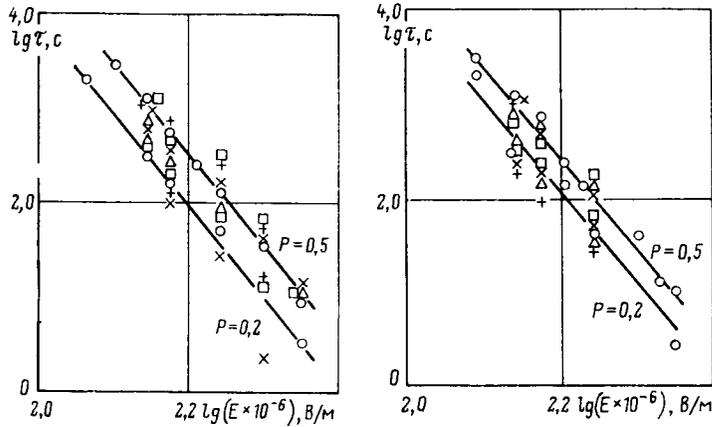


Рис. 5. Зависимости  $lg \tau = \Phi(lg E)$  для ПЭ в жидком азоте при вероятности пробоя 0,5 (1) и 0,2 (2) и температурного режима (77—338) К; исходное состояние (○) и после 50 (+), 100 (□), 150 (Δ) и 200 (×) циклов

Рис. 6. Зависимости  $lg \tau = \Phi(lg E)$  для ПЭ в жидком азоте, при вероятности пробоя 0,5 (1) и 0,2 (2) и температурного режима (77—358) К; исходное состояние (○) и после 50 (+), 100 (Δ), 150 (□) и 200 (×) циклов

фактами увеличивались, а сами дефекты стали более явными.

Величина кратковременной электрической прочности полимеров в среде жидкого азота зависит не только от числа циклов, но и от выбранного режима воздействия (см. рис. 2 и 3 и табл. 1, 2). Однако для пленок Ф-4

Таблица 1

Количество циклов воздействия на пленку Ф-4 толщиной 10 мкм	77 К—473 К			77 К—443 К			77 К—413 К		
	$E_{пр.ср}$ , кВ/мм	S, кВ/мм	$K_{вар.}$ , %	$E_{пр.ср}$ , кВ/мм	S, кВ/мм	$K_{вар.}$ , %	$E_{пр.ср}$ , кВ/мм	S, кВ/мм	$K_{вар.}$ , %
	Исходное состояние	272	18	6,6	272	18	6,6	272	18
25	259	26	10	262	20	7,4	266	19	7,2
50	239	35	15	263	27	10,5	260	24	9,3
75	253	37	15	248	32	13	259	29	9,8
100	239	32	13	246	31	13	260	26	9,3
125	234	35	19	250	40	16	254	30	12
150	236	38	16	253	27	11	252	28	11
175	246	55	23	244	39	19	245	35	14

Таблица 2

Количество циклов воздействия на пленку ПЭ толщиной 40 мкм	77 К—358 К			77 К—338 К		
	$E_{пр.ср}$ , кВ/мм	S, кВ/мм	$K_{вар.}$ , %	$E_{пр.ср}$ , кВ/мм	S, кВ/мм	$K_{вар.}$ , %
Исходное состояние	238	20	8,3	238	20	8,3
25	237	21	8,8	237	43	18
50	236	18	7,7	224	42	19
100	232	21	9,1	210	60	28
150	227	34	15	208	23	11
200	216	56	26	188	55	29

и ПЭ влияние температурного режима проявляется различным образом. Если для пленок Ф-4 увеличение температурного перепада от 336 К до 396 К приводит к более сильному снижению кратковременной электрической прочности от числа циклов, то для пленок ПЭ наблюдается некоторое возрастание кратковременной электрической прочности при увеличении температурного перепада от 338 К до 358 К.

Термокриоциклические воздействия оказывают влияние и на длительную электрическую прочность полимеров в среде жидкого азота. На рис. 4—6 приведены зависимости  $lg \tau = \Phi(lg E)$  для пленок Ф-4 и ПЭ, полученные в среде жидкого азота в исходном состоянии и после различного количества термокриоциклических воздействий. Для пленок Ф-4 наблюдается снижение времени жизни  $\tau$  с увеличением количества термокриоциклических воздействий для исследованных интервалов температуры. Значения времени жизни пленки ПЭ после различного количества термокриоциклических воздействий группируются вблизи значений  $lg \tau$  для исходной пленки и полученные значения не выходят за пределы доверительных границ исходной пленки для уровня значимости  $\alpha$ , равного 0,05. С одной стороны, это может говорить о большей стойкости пленки ПЭ к действию термокриоциклических воздействий по сравнению с пленкой Ф-4. С другой стороны, для окончательного решения о влиянии термокриоциклических воздействий на время жизни пленок ПЭ необходимо провести испытания на время жизни на большей выборке, увеличив ее в несколько раз по сравнению с испытанной.

Анализируя полученные данные по кратковременной и длительной электрической прочности полимерных пленок, а также данные других авторов (например, [3, 4]), видим, что изменение электрической прочности от кр-

Таблица 3

Режим воздействия	Вероятность пробоя	$k \times 10^4$	$E_{пр0}$	$E_{пр\infty}$	$E_{пр0} - E_{пр\infty}$
(77—473) К	0,1	109	242	155	87
	0,2	218	254	198	56
	0,5	315	272	238	34
(77—443) К	0,1	96	242	176	67
	0,2	100	254	198	56
	0,5	171	272	246	26
(77—413) К	0,1	37	242	145	97
	0,2	76	254	198	56
	0,5	144	272	252	20

личества термокриоциклических воздействий в общем случае может быть описано следующими эмпирическими формулами для кратковременной (1) и длительной (2) электрической прочности:

$$E_{пр} = (E_{пр0} - E_{пр\infty}) \exp(-k_1 t) + E_{пр\infty}; \quad (1)$$

$$\lg \tau = (\lg \tau_0 - \lg \tau_\infty) \exp(-k_2 t) + \lg \tau_\infty, \quad (2)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  — коэффициенты, определяющие скорость снижения электрической прочности или времени жизни;  $E_{пр0}$  и  $\tau_0$  — исходные значения электрической прочности и времени жизни;  $E_{пр\infty}$  и  $\tau_\infty$  — конечные установившиеся значения электрической прочности и времени жизни;  $t$  — количество циклов.

Методом наименьших квадратов [7] были определены значения  $k$  и  $E_{пр}$  для пленки Ф-4 при вероятностях пробоя, равных 0,5, 0,2 и 0,1, для исследованных режимов испытания на термокриоциклические воздействия. Полученные значения  $k$  и  $E_{пр}$  приведены в табл. 3.

Значения коэффициента  $k$  увеличиваются, а разность  $E_{пр0} - E_{пр\infty}$ , определяющая наибольшее возможное снижение электрической прочности по сравнению с исходным значением, уменьшается с увеличением вероятности пробоя. Это хорошо видно на зависимости  $E_{пр}/E_{пр0} = \Phi(t)$  (рис. 7). Определение величин  $k$  и  $\lg t$  по зависимости  $\lg \tau = \Phi(t)$  затруднено из-за наличия значительного разброса экспериментальных величин  $\lg t$  после термокриоциклических воздействий. Поэтому были определены значения  $k$  только при напряженности электрического поля  $E = 230$  кВ/мм. Эти величины составляли 0,0387 и 0,0309 для температурных режимов (77—473) К и (77—443) К соответственно. Здесь также, как и для кратковременной электрической прочности (см. табл. 3), величина разности  $\lg \tau_0 - \lg \tau_\infty$  увеличивается с увеличением интервала термокриоциклического воздействия.

Для пленки ПЭ вычисление коэффициентов  $k$  и  $E_{пр\infty}$  не представляется возможным, так как зависимости  $E_{пр} = \Phi(t)$  имеют вид прямых линий (рис. 3). Однако можно показать, что этот случай является частным случаем выражений (1), (2).

Если разложить в ряд Тейлора функцию  $\exp(-kt)$  и ограничиться первым членом разложения, то

$$\exp(-kt) \approx 1 - kt;$$

При подстановке этого выражения в формулу (1) получим следующее выражение:

$$E_{пр} = E_{пр0} - (E_{пр0} - E_{пр\infty}) kt,$$

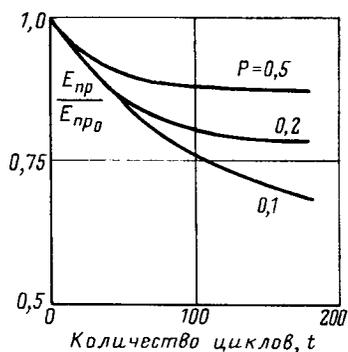


Рис. 7. Зависимости  $E_{пр}/E_{пр0} = \Phi(t)$  для  $\Phi=4$  в жидком азоте и температурного режима (77—473) К при различных вероятностях пробоя

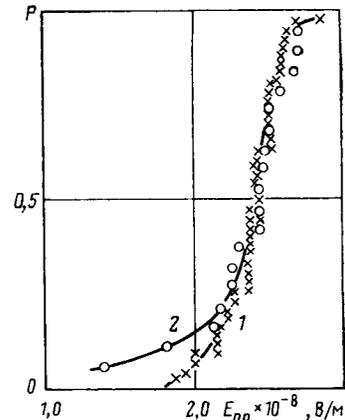


Рис. 8. Зависимости  $P = \Phi(E_{пр})$  для ПЭ в жидком азоте в исходном состоянии (1) и после 100 циклов (2) воздействия температурного режима (77—338) К с выдержкой при температуре 358 К в течение часа

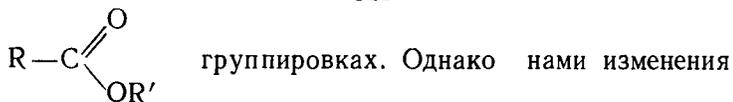
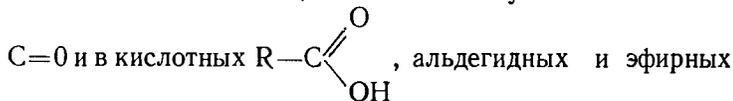
которое представляет собой уравнение прямой линии. Таким образом, угол наклона прямой определяется начальным и конечным значением  $E_{пр}$  и скоростью снижения электрической прочности.

Как отмечалось ранее, основной причиной снижения электрической прочности полимеров в результате термокриоциклических воздействий является образование микродефектов в структуре полимера. Имеется несколько причин образования микродефектов в полимере.

Во-первых, охлаждение полимера до температуры жидкого азота или гелия связано с переходом полимера из высокоэластичного состояния в стеклообразное при температуре стеклования  $T_c$  (для фторлона Ф-4  $T_c = 153$  К, а для ПЭ  $T_c = 193$  К [8]). Стеклование полимера сопровождается перестройкой структуры и возникновением резких внутренних напряжений.

При исследовании ИК-спектров пленок ПЭ и Ф-4 после термокриоциклических воздействий не обнаружено новых полос поглощения. Только для фторлона Ф-4 наблюдается изменение интенсивности полос поглощения 718, 738 и 778  $\text{см}^{-1}$ , которые относятся к колебаниям в аморфной фазе [9]. С увеличением термокриоциклических воздействий интенсивность этих полос возрастает и, следовательно, увеличивается содержание аморфной фазы и разрыхляется структура полимера [10].

В результате механических воздействий на ПЭ как в воздухе, так и в жидком азоте возрастает интенсивность полос поглощения 1710, 1735 и 1742  $\text{см}^{-1}$  [11]. Эти полосы поглощения соответствуют колебаниям



интенсивности в этой области после воздействия термокриоциклических воздействий вплоть до 200 циклов не обнаружено.

Во-вторых, полимерная изоляция при охлаждении до криогенных температур будет испытывать сильные механические напряжения из-за большой усадки по срав-

нению с металлами. Поэтому механические усилия, возникающие в полимере при охлаждении, могут приводить к разрыву полимерных цепей.

Таким образом, при охлаждении полимера вследствие неравномерного распределения внутренних механических напряжений и тепловой энергии происходит одновременный разрыв нескольких связей. Эти связи могут быть обусловлены или силами главных химических валентностей, или силами межмолекулярного воздействия. При этом в результате разрушения цепей макромолекул полимера происходит образование субмикродофектов. Зарождение таких дофектов в ориентированных аморфно-кристаллических полимерах начинается со сравнительно небольшого числа первичных макромолекул в напряженной аморфной области. Образующиеся при этом свободные радикалы инициируют цепной свободнорадикальный процесс, в результате которого образуется субмикродофект [12].

Изучение субмикродофектов в ориентированных аморфно-кристаллических полимерах показало [13], что размеры субмикродофектов остаются постоянными для данного состояния. Основной характеристикой степени развития субмикродофектов является увеличение их концентрации во времени под действием растягивающего напряжения. Накопление подобных дофектов в процессе термодрициклических воздействий приводят к появлению макродофектов, которые вызывают снижение электрической прочности полимеров.

Под действием механических напряжений может происходить механодеструкция высокомолекулярных соединений [15]. Происходит резкое снижение молекулярного веса полимера, что также будет вызывать снижение электрической прочности полимера [14].

В зависимости от условий испытаний и, следовательно, от соотношения скоростей процессов разрушения и релаксации напряжений дофект может расти или самозалечиваться. Согласно [13] процесс самозалечивания полимера в процессе отдыха увеличивается с повышением температуры, особенно резко вблизи температур стеклования и текучести полимера.

Видимо, этим объясняется большее снижение пробивного напряжения полиэтиленовой пленки при термодрициклических воздействиях для температурного интервала (77—338) К, чем для (77—358) К. Для подтверждения этого предположения было определено пробивное напряжение пленки ПЭ после 100 циклов воздействия температурного интервала (77—338) К до и после выдержки ее в термостате при температуре 358 К в течение одного часа. Как видно из рис. 8 зависимость  $P\text{-}\Phi$  ( $E_{пр}$ ) практически легла на исходную зависимость. Это доказывает большое влияние релаксации напряжения на процесс самозалечивания полимера при термодрициклических воздействиях. Отсюда также можно сделать вывод о том, что влияние термодрициклических воздействий на электрическую прочность будет определяться такими факторами, как температурный интервал воздействия, скорость охлаждения и нагрева полимера, которые требуют дальнейшего исследования.

**Выводы.** 1. Величина кратковременной и длительной электрической прочности полимеров снижается с увели-

чением количества термодрициклических воздействий. Наибольшее снижение электрической прочности наблюдается при малых вероятностях пробоя.

2. Изменения электрической прочности и времени жизни полимеров от количества термодрициклических воздействий могут быть удовлетворительно описаны экспоненциальной зависимостью.

3. Основной причиной снижения электрической прочности полимеров при термодрициклических воздействиях следует считать образование микродофектов в полимере вследствие неравномерного распределения внутренних механических напряжений и тепловой энергии при охлаждении.

4. При дальнейшем изучении влияния термодрициклических воздействий на электрические свойства полимеров необходимо провести исследования таких факторов, как температурный интервал воздействия, скорость охлаждения и нагрева полимера, внутренние механические напряжения в полимере. Эти данные необходимы для выработки практических рекомендаций по конструированию и эксплуатации криогенных электрических устройств с полимерной изоляцией.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сверхпроводящие машины и устройства / Под ред. С. Фонера и Б. Шварца. — М.: Мир, 1977.
2. Веников В. А., Зуев З. Н. Криогенные кабельные линии. — В кн.: Электротехнические материалы, электрические конденсаторы, провода и кабели, т. 9. Сверхпроводимость и ее применение (Итоги науки и техники ВИНТИ АН СССР). — М.: 1977.
3. Белый Д. И., Свалов Г. Г. Сверхпроводящие и криорезистивные провода для криогенной техники. — М.: Информэлектро, 1977.
4. Свалов Г. Г., Хан Э. А., Шварцбург Е. Я. Методика испытаний эмалированных проводов на стойкость к воздействию факторам. — ЭП. Кабельная техника, 1979, вып. 5 (171).
5. Канискин В. А., Середа Г. Г. Влияние криоциклических воздействий на старение полимеров. — В кн.: Тезисы докладов I Всесоюзной научно-технической конференции «Свойства и применение полимерных материалов», Якутск: Якутский филиал СО АН СССР, 1977.
6. Влияние длительности выдержки и частоты поля на старение полимеров в жидком азоте / В. А. Канискин, Г. Г. Середа, Д. Д. Румянцев, Н. Н. Хренков. — Электричество, 1977, № 10.
7. Румшицкий Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. — М.: Наука, 1971.
8. Справочник по пластическим массам / Под ред. В. М. Кагаева. т. 1. — М.: Химия, 1975.
9. Инфракрасная спектроскопия полимеров / И. Дехант, Р. Данц, В. Киммер, Р. Шмальке. — М.: Химия, 1976.
10. Miller R. Y. J., Willis H. A. An independent measurement of the amorphous content of polymers. — J. of Polymer Science. 1956. vol. 19, N 93.
11. Журков С. Н., Новак И. И., Веттергрень В. И. Изучение механохимических превращений в полиэтилене методом инфракрасной спектроскопии. — Д. АН СССР, 1964, т. 157.
12. Регель В. Р., Слущер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая теория прочности твердых тел. — М.: Наука, 1978.
13. Гуль В. Е. Структура и прочность полимеров. — М.: Химия, 1978.
14. Барабой Н. К. Механохимия высокомолекулярных соединений. — М.: Химия, 1978.
15. Балабан Н. П., Колесов С. Н. Электрические свойства полимерных диэлектриков. — ЭП. Электротехнические материалы, 1977, вып. 2 (79).

[15.08.86]



нием нелинейной динамической модели АД, заданной дифференциальными уравнениями, следующими из уравнений АД:

$$\frac{d\hat{\Psi}_r}{dt} = A_{21}i_s + A_{22}\hat{\Psi}_r + (\omega_c - \hat{\omega})L\psi_r; \quad (4)$$

$$\frac{d\hat{\omega}}{dt} = \frac{z_p}{J} \left( \frac{3z_p k_r}{2} \psi_r^T L i_s - u_n \right), \quad (5)$$

где символ « $\wedge$ » означает принадлежность переменной уравнениям модели;  $\hat{\omega}$  — оценка угловой скорости ротора;  $u_n$  — идентификационное управление моделью.

Модель подключается параллельно объекту и подвергается одновременно трем управлениям, причем  $i_{1s}$ ,  $i_{2s}$  и  $\omega_c$  рассматриваются как управляющие воздействия. Блок преобразования координат (БПК)  $i_s$  к  $i_1$  реализует преобразование, которое в тригонометрической форме имеет вид:

$$i_{\alpha s} = i_{1s} \cos(\theta_c - \hat{\theta}_2 + \theta_2) - i_{2s} \sin(\theta_c - \hat{\theta}_2 + \theta_2); \quad (6)$$

$$i_{\beta s} = i_{1s} \sin(\theta_c - \hat{\theta}_2 + \theta_2) + i_{2s} \cos(\theta_c - \hat{\theta}_2 + \theta_2), \quad (7)$$

где  $\theta_2$  — текущий угол между осями обмоток фаз ротора и статора двигателя;  $\hat{\theta}_2$  — соответствующий угол на модели.

Очевидно, что уравнения модели после преобразований (6) и (7) совпадают по структуре с уравнениями АД в неподвижной ортогональной системе координат.

Рассмотрим задачу стабилизации потокосцепления ротора. Основная трудность здесь заключается в том, чтобы за счет организации многомерного скользящего режима на модели АД линейаризовать уравнения, описывающие движение координат вектора потокосцепления ротора. Установлено, что организация двухмерного скользящего режима по поверхностям  $\sigma_2 = \hat{\Psi}_{2r} = 0$  и  $\sigma_1 = \hat{\Psi}_{1r} - \hat{\Psi}_{1r}^* = 0$  с помощью разрывных управлений  $i_{1s} = I_m \text{sign } \sigma_1$  и  $i_{2s} = I_m \text{sign } \sigma_2$ , где  $\hat{\Psi}_{1r}^*$  — заданное значение потокосцепления ротора, позволяет линейаризовать модель АД. Если параметры модели достаточно близки к параметрам АД, то использование  $i_{1s}$ ,  $i_{2s}$  и  $\omega_c$  для управления двигателем обеспечивает линейный характер процессов непосредственно в АД. Линейаризованные на скользящем режиме уравнения, описывающие движение выходной координаты, имеют вид:

$$\frac{d\hat{\omega}}{dt} = (\omega_c - \hat{\omega}) \frac{1}{T_{эм}} - u_n,$$

где

$$T_{эм} = \frac{2J I_m}{3z_p k_r T_r (\hat{\Psi}_{1r}^*)^2}; \quad T_r = \frac{l_2'}{r_2};$$

$$i_{1s \text{ экв}} = -\frac{\hat{\Psi}_{1r}^*}{I_m}.$$

Для постоянного значения  $\hat{T}_{эм}$  можно осуществить стандартную настройку регулятора скорости с передаточной функцией  $W_{p.c}(p) = \frac{\beta_c(\tau_c p + 1)}{\tau_c p}$ ;

$$\hat{T}_{эм} p [\hat{T}_{эм} \tau_c \tau_{и} p^3 + (\beta_c + \beta_{и}) \tau_c \tau_{и} p^2 + (\tau_{и} \beta_c + \tau_c \beta_{и}) p + \beta_c \beta_{и} (\tau_c p + 1)(\tau_{и} p + 1)],$$

приняв

$$a_0 = 1, \quad a_1 \omega_0 = \frac{\beta_c + \beta_{и}}{T_{эм}}, \quad a_3 \omega_0^3 = \frac{\beta_c \beta_{и} (\tau_{и} + \tau_c)}{\hat{T}_{эм}^2 \tau_c \tau_{и}},$$

$$a_2 \omega_0^2 = \frac{\tau_{и} \beta_c + \tau_c \beta_{и}}{\hat{T}_{эм} \tau_c \tau_{и}} + \frac{\beta_c \beta_{и}}{\hat{T}_{эм}^2}, \quad a_4 \omega_0^4 = \frac{\beta_c \beta_{и}}{\hat{T}_{эм}^2 \tau_c \tau_{и}},$$

где параметры регулятора определены по стандартной форме Баттерворта:

$$a_0 p^4 + a_1 \omega_0 p^3 + a_2 \omega_0^2 p^2 + a_3 \omega_0^3 p + a_4 \omega_0^4.$$

В уравнение модели двигателя входит идентификационная составляющая управления  $u_n$ . Необходимость идентификационного управления, которое в системе реализуется с помощью пропорционально-интегрирующего звена, обусловлена переменностью момента инерции и момента статических сил со-

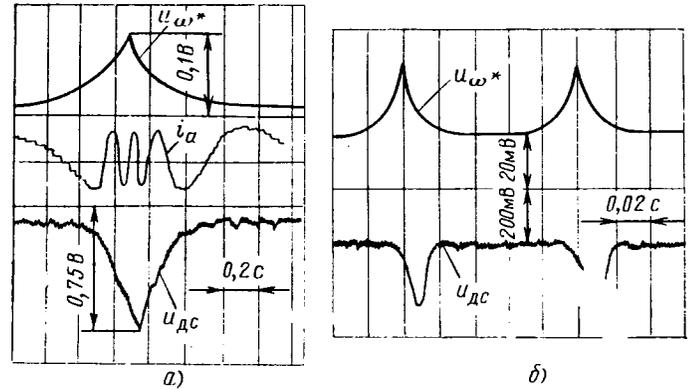


Рис. 3. Осциллограммы переходных процессов в асинхронном электроприводе с нелинейной моделью: а — система с постоянным вторичным потоком; б — система с подчиненным регулированием момента

противления на валу механизма, т. е. в уравнении, описывающем движение электромеханической части двигателя

$$\frac{d\omega}{dt} = (\omega_c - \omega) \frac{1}{T_{эм}} - k_M M_c,$$

где  $k_M = z_p / J$ , есть составляющая момента сил сопротивления, недоступная прямому измерению. Величина  $T_{эм}$  также может существенно отличаться от  $\hat{T}_{эм}$ . Поэтому задача идентификационного управления заключается в управлении выходной координатой модели таким образом, чтобы исключить ошибку между ее движением и движением выходной координаты двигателя. Передаточная функция идентификационного регулятора строится в виде

$$W_{и.р}(p) = \frac{\beta_{и} (\tau_{и} p + 1)}{\tau_{и} p}.$$

Контур идентификации также настраивается по стандартной форме, причем передаточные функции регуляторов  $W_{p.c}(p)$  и  $W_{и.р}(p)$  целесообразно разделять по быстрдействию [4]. При таком управлении в скользящем режиме обеспечиваются линейные свойства асинхронного электропривода. Рассмотрим систему управления с подчиненным регулированием момента АД. В некоторых случаях структура с постоянным вторичным потоком может оказаться неадекватной, так как необходимость стабилизации потока приводит к снижению коэффициента мощности в области малого момента нагрузки. Улучшить энергетические показатели можно изменяя вторичный поток в функции момента сил сопротивления на валу АД. Однако датчики момента в реальных системах отсутствуют. Поэтому контур регулирования предлагается строить на нелинейной модели АД. Структурная схема модели с подчиненным регулированием момента приведена на рис. 2, где  $T_{и}$  — малая постоянная времени контура момента;  $u_{и}$  — идентификационное воздействие на модель. Регулирование момента осуществляется с помощью разрывной функции  $\omega_{\psi} = M_r \text{sign}(M^* - \hat{M})$ . На скользящем режиме данная система устойчива, а доопределенное управление

$$\omega_{\psi \text{ экв}} = \frac{\dot{\omega}^* + \hat{M} \frac{1}{T_{и}} + k_M M_c}{1 + \frac{k_M}{k_{д.с}}}.$$

К достоинствам этой структуры следует отнести то, что значение составляющей потокосцепления  $\hat{\Psi}_{1r}$  не поддерживается постоянным, а автоматически устанавливается того минимального значения, которое необходимо для создания заданного регулятором скорости момента.

**Заключение.** 1. Экспериментальное исследование (рис. 3, а, б) показало, что разрывное управление с преднамеренной организацией скользящих режимов на нелинейной модели АД позволяет обеспечить инвариантность привода к параметрическим и сигнальным возмущениям, повысить качество динамики переходных процессов в АД, и, кроме того, при достаточно точных параметрах модели придать приводу линейные свойства.

2. Техническая реализация унифицированными аппаратными средствами разработанных моделей определяет их использование в качестве адаптивных регуляторов, подключаемых к серийно выпускаемому асинхронным электроприводам в точках подключения комплектов регуляторов.

3. Таким образом, в условиях аддитивных возмущений, когда линейные регуляторы теряют работоспособность, для качественного управления АД эффективным оказывается применение разрывных управлений на скользящих режимах модели АД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О. В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, И. С. Кузнецов и др. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 256 с.
2. Уткин В. И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. — М.: Наука, 1981. — 368 с.
3. Изосимов Д. Б. Скользящий асинхронный электропривод. — В кн.: Методы синтеза систем с разрывным управлением на скользящих режимах. — 1983. с. 44—51.
4. Борцов Ю. А., Юнгер И. Б. Адаптивные электромеханические системы с непрямым разрывным управлением. — Электричество, 1985, № 1, с. 32—36.

[12.09.86]

УДК 621.313.013.001.24

## Численный расчет магнитных и тепловых полей в электрических машинах и аппаратах методом исключения с декомпозицией

ИЭМЕНИ Т. М.

При уточненных расчетах магнитных и тепловых полей в электрических машинах и аппаратах, выполняемых, как правило, на ЭВМ, для неоднородных областей задания поля одним из наиболее эффективных прямых методов решения является метод исключения внутренних точек области [1—3]. Он позволяет быстро выполнять расчет поля на сетках с весьма большим числом узлов. Этот метод в своей основе реализует идею метода распространения вектора ошибки, изложенную в [4]. Основная идея метода исключения, называемого также маршевым методом, заключается в следующем. Используется известная пятиточечная разностная формула

$$A_{i+1, j} = a_{ij}A_{ij} - (a_i, j+1A_{i, j+1} + a_i, j-1A_{i, j-1} + a_{i-1, j}A_{i-1, j}) - P_{ij}, \quad (1a)$$

где  $i$  и  $j$  — номера трех соседних горизонталей и вертикалей;  $ij$  — координаты центрального узла расчетного «креста»;  $A_k$  — искомые потенциалы (температуры);  $P_{ij}$  — источник поля в узле  $ij$ ;  $a_k$  — постоянные коэффициенты.

Если известны потенциалы узлов на горизонталях  $i - 1$  и  $i$ , то потенциал любого  $j$ -го узла на  $(i+1)$ -й горизонтали может быть определен по этой формуле. Таким же образом определим потенциалы всех узлов на  $(i+2)$ -й горизонтали и т. д. В конечном итоге потенциалы узлов какой-либо горизонтали  $l$  будут выражены через линейную комбинацию потенциалов горизонталей  $i - 1$  и  $i$  по формуле

$$\bar{A}_l = D_l \bar{A}_i + D_{l-1} \bar{A}_{i-1} + \bar{F},$$

где  $\bar{A}_k$  и  $\bar{F}$  — векторы потенциалов и правых частей;  $D_k$  — матрицы коэффициентов.

При этом все внутренние горизонталю будут исключены. Сама процедура исключения часто называется маршем от горизонталей  $i - 1$ ,  $i$  к горизонтали  $l$ , а число исключенных горизонталей  $k = l - i$  называют длиной марша. Недостатком метода исключения является ограниченная длина марша, что объясняется появлением вычислительной неустойчивости, обусловленной быстрым ростом коэффициентов матрицы  $D_k$  с ростом длины марша. Чтобы избежать этого недостатка и рас-

ширить расчетную область, не превышая допустимой длины марша, разработано несколько методов декомпозиции исходной области (прямоугольника) [5, 6]. Декомпозиция состоит в разделении исходного прямоугольника на ряд подобластей и исключении внутренних горизонталей в каждой подобласти. Обратная композиция в каждом методе осуществляется по-разному. Настоящая статья посвящена рассмотрению и сравнению этих методов.

Метод исключения с многократным отделением областей [5]. Рассмотрим расчетную область в виде прямоугольника, имеющего  $N+2$  горизонталей и  $M+2$  вертикалей, который разбит на несколько подобластей, причем каждая подобласть отделена от соседних двумя горизонталями (рис. 1). Не уменьшая общности, примем для простоты, что потенциал на контуре прямоугольника равен нулю. Обозначим далее через  $\bar{A}_i$   $i$ -й неизвестный  $M$ -мерный вектор потенциалов и через  $B_i(D_i)$  — квадратную матрицу размерностью  $M \times M$ .

1. Расчет поля в двух крайних верхних подобластях. Для векторов  $\bar{A}_1$  и  $\bar{A}_2$  на нижней паре горизонталей  $l$  (см. рис. 1) можем написать

$$\bar{A}_1 = B_1 \bar{A}' + \bar{F}_1; \quad (1)$$

$$\bar{A}_2 = B_2 \bar{A}' + \bar{F}_2, \quad (2)$$

где  $\bar{F}_i$  —  $M$ -мерный вектор правой части от токов в нижней подобласти;  $\bar{A}'$  —  $M$ -мерный вектор потенциалов на первой горизонтальной линии.

Коэффициенты матриц  $B_1$  и  $B_2$  могут быть легко получены с помощью поочередных маршей от первой горизонтали, соответствующей вектору  $\bar{A}$ . При этом столбец координат вектора  $\bar{A}'$  содержит одну единицу (при остальных нулях) и ее местоположение в столбце меняется при каждом последующем марше.

Определяя из (2)  $\bar{A}' = B_2^{-1} \bar{A}_2 - B_2^{-1} \bar{F}_2$  и подставляя его в (1), получаем

$$\bar{A}_1 = D_1 \bar{A}_2 + \bar{F}'_1, \quad (3)$$

где  $D_1 = B_1 B_2^{-1}$  и  $\bar{F}'_1 = \bar{F}_1 - D_1 \bar{F}_2$ .

Уравнение (3) позволяет нам отделить нижнюю подобласть  $l$ . Действительно, поскольку вектор  $\bar{A}_1$  выражается линейно через вектор  $\bar{A}_2$ , можно написать

$$\left. \begin{aligned} \bar{A}_3 &= B_3 \bar{A}_2 + \bar{F}_3; \\ \bar{A}_4 &= B_4 \bar{A}_2 + \bar{F}_4. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Коэффициенты матриц  $B_3$  и  $B_4$  могут быть аналогично вышесказанному получены с помощью ряда маршей от горизон-

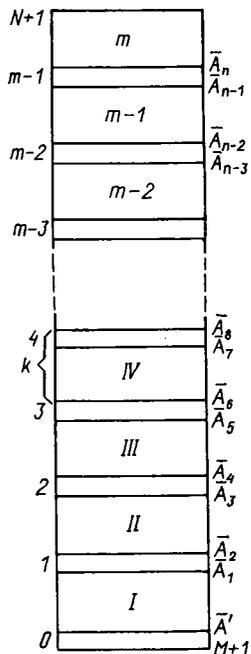


Рис. 1. Разделение прямоугольника на подобласти в методе многократного отделения

талей, соответствующих векторам  $\bar{A}_2$  и  $\bar{A}_1$ , к горизонтали, соответствующей вектору  $\bar{A}_4$ . При этом, как и выше, столбец координат вектора  $\bar{A}_2$  содержит одну единицу (при остальных нулях), а соответствующий столбец координат вектора  $\bar{A}_1$  определяется первым слагаемым правой части (3).

Из (4) аналогично предыдущему получим  $\bar{A}_3 = D_2 \bar{A}_4 + \bar{F}'_3$ , где  $D_2 = B_3 B_4^{-1}$ . Это позволит отделить подобласть II и перейти к определению связи векторов  $\bar{A}_5$  и  $\bar{A}_6$  с вектором  $\bar{A}_4$  и т. д. Наконец, на последней верхней паре горизонталей  $m-1$  получим, что

$$\bar{A}_{n-1} = D_m \bar{A}_n + \bar{F}'_{n-1}, \quad (5)$$

это позволяет перейти к самой верхней  $N+1$  горизонтали, для которой

$$\bar{A}_{N+1} = B_{n+1} \bar{A}_n + \bar{F}_n = 0. \quad (6)$$

Решив систему (6), найдем вектор  $\bar{A}_n$  и по (5) найдем вектор  $\bar{A}_{n-1}$ . Зная потенциалы на верхней паре горизонталей  $m-1$ , определим потенциалы в двух крайних верхних под областях  $m$  и  $m-1$ , прилегающих к этой паре, пользуясь пятиочной разностной формулой. Очевидно, что повторив все вышеприведенные операции, двигаясь сверху вниз, найдем поле в двух крайних нижних под областях I и II прямоугольника.

Структурная схема данного алгоритма показана на рис. 2, а. В ней приняты во внимание только двумерные массивы памяти размерности  $M \times M$ , необходимые для размещения тех или иных матриц. Требуемыми при выполнении тех или иных действий над матрицами дополнительными одномерными массивами памяти (размерности  $M$ ) для упрощения изложения пренебрегаем, поскольку они занимают значительно меньший объем памяти.

Из структурной схемы видно, что для расчета поля в двух самых верхних под областях прямоугольника достаточно хранить информацию в двух массивах памяти  $A_1$  и  $A_2$  размером  $2M^2$  (здесь двойка появляется потому, что, как показала практика расчетов методом исключения, целесообразно всегда производить вычисления с двойной точностью).

Оценим теперь необходимое число арифметических операций. Число операций, необходимых для формирования матриц  $B_i$ , составляет величину порядка  $k_i M^2$  ( $k_i$  — длина марша); это число операций мало по сравнению с числом операций, необходимым для обращения или перемножения матриц и имеющих порядок  $M^3$ , и им можно пренебречь при условии, что  $k_i$  в несколько раз меньше  $M$ , что всегда имеет место при больших  $M$ . Тогда на каждое отделение требуется одно перемножение и одно обращение матрицы  $M \times M$ . Если учесть, что на то и другое необходимо примерно  $2M^3$  операций [7], то общее число операций в данном случае составит примерно  $4M^3(L-1)$ , где  $L$  — число подобластей, на которые разбит исходный прямоугольник.

2. Расчет поля в двух средних под областях. Пусть необходимо определить поле в некоторых средних под областях, например в под областях III и IV на рис. 1. В данном случае следует последовательно отделить все под области снизу вплоть до под области III, и при этом получим

$$\bar{A}_3 = D_2 \bar{A}_4 + \bar{F}'_3, \quad (7)$$

Затем аналогично следует последовательно отделить все под области сверху вплоть до под области III, и при этом получим

$$\bar{A}_6 = D_6 \bar{A}_5 + \bar{F}_6. \quad (8)$$

Теперь, используя (8), можно записать

$$\bar{A}_4 = D_4 \bar{A}_5 + \bar{F}_4; \quad (9)$$

$$\bar{A}_3 = D_3 \bar{A}_5 + \bar{F}_3. \quad (10)$$

Используя (7), (9) и (10), имеем

$$D \bar{A}_5 = \bar{F}, \quad (11)$$

где  $D = D_2 D_4 - D_3$ ;  $\bar{F} = \bar{F}_3 - \bar{F}'_3 - D_2 \bar{F}_4$ .

Решив систему (11), найдем  $\bar{A}_5$ , а по (8) —  $\bar{A}_6$ . Зная  $\bar{A}_5$  и  $\bar{A}_6$ , определим поле в под областях III и IV. Структурная схема данного алгоритма приведена на рис. 2, б, из которого видно, что в этом случае требуется объем памяти примерно  $6M^2$  (с учетом двойной точности), а число операций остается примерно тем же, что и в предыдущем случае.

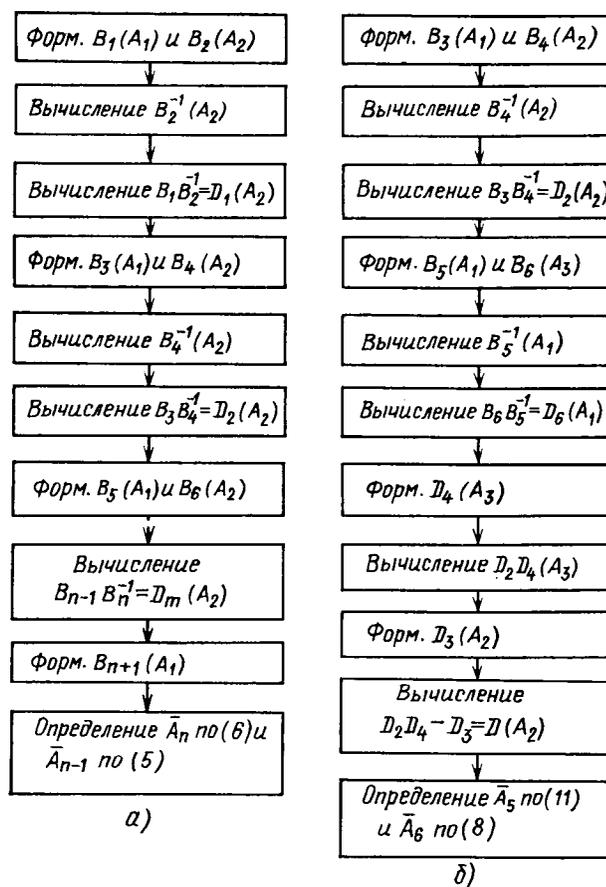


Рис. 2. Структурные схемы алгоритмов метода исключения с многократным отделением: а — при расчете поля в двух крайних верхних под областях; б — то же в двух средних под областях (в скобках после обозначения матрицы указано наименование массива памяти; например: «форм.  $B_1(A_1)$ » означает, что формируется матрица  $B_1$  и размещается в массиве А)

3. Расчет поля во всем прямоугольнике. В этом случае начало расчета вплоть до определения векторов  $\bar{A}_n$  и  $\bar{A}_{n-1}$  верхней пары горизонталей  $m-1$  в точности совпадает с первым случаем. Однако, как отмечалось выше, при этом можно найти потенциалы только в двух верхних под областях  $m$  и  $m-1$ , прилегающих к этой паре (см. рис. 1). Дальнейшее движение вниз от одной горизонтали к другой с помощью пятиочной разностной формулы невозможно из-за накопления вычислительной погрешности, которая достигает предельно допустимого значения на длине  $i$ -го марша, т. е. через  $k_i$  линий. Поэтому следующим этапом является повторение расчета по алгоритму первого случая сверху вниз, завершающееся определением векторов  $\bar{A}_1$  и  $\bar{A}_2$ . Если прямоугольник разделен на четыре под области, то на этом расчет заканчивается. В противном случае необходимо продолжить расчет аналогично предыдущему, однако при этом следует учесть, что потенциалы  $\bar{A}_{n-1}$  и  $\bar{A}_2$  уже известны и являются граничными, т. е. прямоугольник укоротился на высоту под областей I и m (рис. 1).

Теперь снова проходим вверх от верхней горизонтали первой пары, определяя вектор. потенциалы  $\bar{A}_{n-3}$  и  $\bar{A}_{n-2}$ , и вниз от нижней горизонтали  $m-1$  пары, определяя векторы  $\bar{A}_3$  и  $\bar{A}_4$ . Если прямоугольник был разделен на шесть под областей, то на этом расчет заканчивается, если же нет, то продолжится аналогичным образом. Так же, как и в алгоритме первого случая, в данном требуемый объем памяти составляет  $4M^2$ , независимо

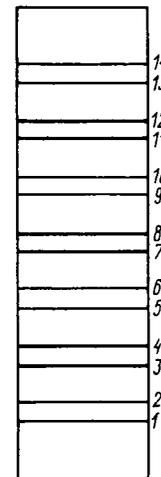


Рис. 3. Разделение прямоугольника на под области в методе исключения приведением к блочной трехдиагональной матрице

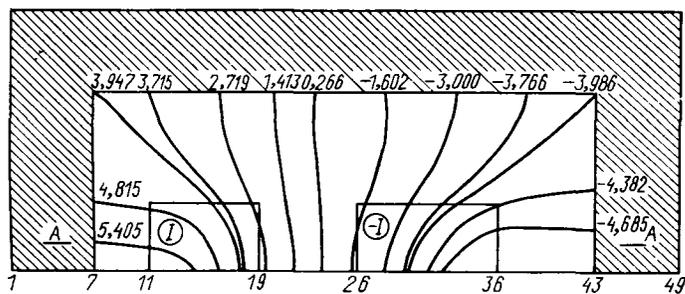


Рис. 4. Картина магнитного поля в верхней части окна трансформатора

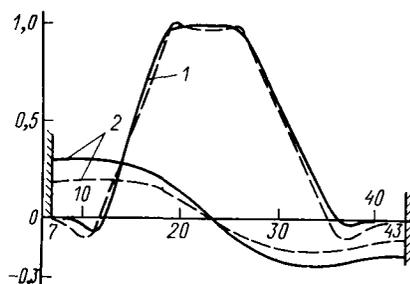


Рис. 5. Распределение вертикальной и горизонтальной составляющих индукции в окне трансформатора вдоль линии А—А: 1 — вертикальная составляющая индукции; 2 — горизонтальная составляющая индукции

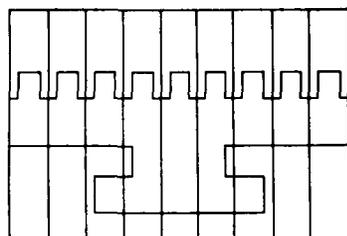


Рис. 6. Схема разделения расчетной области в активной зоне гидрогенератора на подобласти

от числа отделений, а число операций определяется с учетом всех отделений подобластей из расчета, что на каждое отделение (на каждую пару горизонталей, разделяющих две соседних подобласти) приходится одно обращение матрицы и одно перемножение матриц (на каждое из которых, в свою очередь, требуется  $2M^3$  арифметических операций).

Метод исключения с отделением областей может быть применен и для областей более сложной конфигурации, составленных из нескольких прямоугольников. При этом отделение подобластей по-прежнему основано на использовании уравнений типа (1)–(3), позволяющих выразить потенциал на одной из пары горизонталей, отделяющих данную подобласть, через линейную комбинацию потенциалов на другой горизонтали этой пары. При этом размерность векторов и матриц в уравнениях типа (1)–(3) для каждой отделяемой подобласти может быть различной в зависимости от конфигурации данной области. Так, при расчете магнитного поля для области типа воздушного зазора с пазами удобно отделить подобласти пазов и вести расчет в оставшейся средней подобласти воздушного зазора по формулам типа (7)–(10).

Метод исключения с приведением к блочной трехдиагональной матрице. Возможно также совершать марши между горизонталями таким образом, чтобы матрица системы имела трехдиагональный вид. Идею этого метода поясним на примере прямоугольника, разделенного на восемь подобластей (рис. 3). Выражая потенциалы на горизонтали 0 через потенциалы на горизонталях 1 и 2 (совершая соответствующие марши), получаем

Таблица 1

L	Исключение с многократным отделением областей		Исключение с промежуточными горизонталями		Исключение с приведением к трехдиагональной матрице		Метод Гаусса	
	Число операций $\times M^{-3}$	Память $\times M^{-2}$	Число операций $\times M^{-3}$	Память $\times M^{-2}$	Число операций $\times M^{-3}$	Память $\times M^{-2}$	Число операций $\times M^{-3}$	Память $\times M^{-2}$
4	24	4	56	24	48	24	60	60
6	64	4	84	40	80	40	90	90
8	120	4	112	56	112	56	120	120
10	192	4	140	72	144	72	150	150
16	504	4	224	120	240	120	240	240

Таблица 2

L	Исключение с многократным отделением областей		Исключение с промежуточными горизонталями		Исключение с приведением к трехдиагональной матрице		Метод Гаусса	
	Число операций $\times M^{-3}$	Память $\times M^{-2}$	Число операций $\times M^{-3}$	Память $\times M^{-2}$	Число операций $\times M^{-3}$	Память $\times M^{-2}$	Число операций $\times M^{-3}$	Память $\times M^{-2}$
4	16	6	36	8	32	6	60	30
6	24	6	54	8	48	6	90	30
8	32	6	72	8	64	6	120	30
10	40	6	90	8	80	6	150	30
16	64	6	144	8	128	6	240	30

$$D_1 \bar{A}_1 + D_2 \bar{A}_2 = \bar{F}_1.$$

Выражая потенциалы на горизонтали 3 через потенциалы на горизонталях 1, 2 (совершая марши от горизонталей 1, 2 к горизонтали 3), имеем

$$D_1' \bar{A}_1 + D_2' \bar{A}_2 + \bar{A}_3 = \bar{F}_3.$$

Далее, совершая марш от горизонталей 3, 4 к горизонтали 2, получаем

$$\bar{A}_2 + B_3 \bar{A}_3 + B_4 \bar{A}_4 = \bar{F}_2$$

и т. д. Нетрудно заметить, что при таком подходе матрица коэффициентов системы имеет трехдиагональный вид.

При решении полученной системы с блочной трехдиагональной матрицей методом Гаусса потребуются  $16(L-1)M^3$  арифметических операций и объем памяти  $8(L-1)M^2$  (при двойной точности). В данном методе также возможно определение поля только в двух каких-либо соседних подобластях. При этом требуются  $8(L-1)M^3$  арифметических операций и память  $6M^2$  (при двойной точности).

В табл. 1 приведены данные требуемых чисел арифметических операций и памяти в функции числа L подобластей, на которые разбит исходный прямоугольник, для вышеперечисленных методов определения поля во всем прямоугольнике.

В табл. 1 приведены также аналогичные данные о методе исключения с декомпозицией с введением промежуточных горизонталей, предложенном в [6], и методе Гаусса, если его применять непосредственно к исходной системе конечно-разностных уравнений (с учетом ее ленточной структуры). При подсчете вычислительных характеристик по методу Гаусса была использована формула  $N=kL$  и принята длина марша  $k=15=\text{const}$  для всех подобластей. Кроме того, для всех методов, кроме Гаусса, при определении объема памяти была принята двойная точность (в соответствии с принятой длиной марша).

Как видно из табл. 1, методы исключения с промежуточными горизонталями и с приведением к трехдиагональной матрице имеют практически одинаковые вычислительные характеристики и по числу операций очень близки к методу Гаусса, но требуют вдвое меньшего объема памяти, чем последний. Метод исключения с многократным отделением областей по объему памяти выгодно отличается от этих трех, а по числу операций при  $L$  порядка десятков не намного превосходит их. Это позволяет при больших  $L$  и  $M$  работать с методом многократного отделения областей, обходясь только оперативной памятью или сократив до минимума число обращений к внешней памяти, в то время как при использовании других трех методов необходимо многократное обращение к внешней памяти, что существенно увеличивает время счета. Так, если, например,  $M=100$  и  $L=16$ , то при методе многократного отделения потребуется  $4 \cdot 10^4$  ячеек памяти, а в остальных случаях их потребуется не менее  $1,2 \cdot 10^6$ .

В табл. 2 приведено сравнение тех же методов при определении поля в каких-либо двух соседних подобластях исходного прямоугольника. В первых трех методах исключения, как и выше, принята двойная точность. Объем памяти в методе Гаусса, который необходимо сохранить в данном случае, определяется принятой длиной марша ( $2k=30$ ). Из табл. 2 видно, что и в этом случае наиболее выгодным является метод многократного отделения. Так, при  $L=16$  он требует в 4 раза меньшего числа операций и впятеро меньшей памяти, чем метод Гаусса. Наиболее близок к нему метод исключения с приведением к трехдиагональной матрице, имеющий наиболее простой алгоритм. В случае применения метода Гаусса при больших  $M$  и  $L$  и ограниченном объеме оперативной памяти и здесь не обойтись без внешней памяти.

В качестве примера приведем некоторые результаты расчета магнитного поля в окне трансформатора методом многократного отделения в режиме противовключения ( $I_1 \omega_1 = -I_2 \omega_2$ ). Относительная магнитная проницаемость  $\mu$  стали магнитопровода была принята равной 3000. Расчет проводился на ЭВМ БЭСМ-6 с двойной точностью (порядка  $10^{24}$ ), что позволило принять длину марша  $k=16$ . Была принята равномерная сетка с числом вертикалей  $M=49$  и числом подобластей, на которые разделен прямоугольник окна трансформатора,  $L=15$ , что соответствует 210 горизонталям, при этом число узлов сетки составляет 10290. Время расчета поля в двух самых верхних подобластях, приведенное к аппаратной реализации операций, выполняемых с двойной точностью, составило 4,6 мин. Время аналогичного расчета на той же ЭВМ по методу Гаусса составило 30 мин. Расчетная картина поля в самой верхней части окна приведена на рис. 4, а распределение вертикальной и горизонтальной составляющих индукции вдоль линии  $A-A$  — на рис. 5.

Для сравнения был также произведен расчет поля в окне для  $L=2$ , что соответствует 28 горизонталям (короткое, но широкое окно). Распределение вертикальной и горизонтальной составляющих индукции для этого случая вдоль линии  $A-A$  показано на рис. 5 пунктиром. На этом рисунке значения всех индукций даны в относительных единицах, а за базовое принято максимальное значение вертикальной составляющей индукции. (По оси абсцисс на рис. 4 и 5 отложены порядковые номера вертикальных линий сетки.)

Для проверки точности результаты расчета поля в окне трансформатора методом многократного отделения при  $\mu=10^5$  (ненасыщенная сталь магнитопровода) были сопоставлены с данными расчетов, проведенных с использованием точного аналитического решения, полученного для этого случая в [8] в виде быстро сходящихся рядов (при  $\mu \rightarrow \infty$ ). Данные обоих расчетов достаточно близки. Наибольшее расхождение между результатами расчетов этими методами не превышает 0,5%. Кроме того, был проведен ряд контрольных расчетов магнитного поля методом исключения с многократным отделением областей на сетках, содержащих до 10000 узлов, в однородных и неоднородных пра-

моугольных областях, на ЭВМ БЭСМ-6 и сопоставлены результаты расчета этим методом и методом Гаусса. Данные расчетов обоими методами совпадают до пятого знака.

Аналогичным образом можно «обработать» и расчетную область задания поля в электрической машине, например в гидрогенераторе, показанную на рис. 6. Так, при девяти пазах на полюс, как показано на этом рисунке, исходный прямоугольник удобно разделить на девять подобластей. Такая схема особенно удобна, если нас интересует уточненная картина поля в области какого-либо паза. При этом, покрывая всю область довольно густой сеткой, можно быстро рассчитать картину поля в интересующей нас подобласти. В случае наличия периодических граничных условий здесь следует применять метод исключения с приведением к трехдиагональной матрице. При этом матрица становится не чисто трехдиагональной, но это не намного увеличивает время расчета. Методы исключения с декомпозицией могут быть использованы при определении проводимостей контуров для метода МПЗК.

В заключение отметим, что описанные выше методы могут быть применены и для решения нелинейных задач (например, при расчетах магнитного поля с учетом насыщения стали) в тех случаях, когда на каждом шаге расчета нелинейная задача приводится к решению соответствующей системы линейных уравнений: например, в методе простых итераций или в методе Ньютона — Канторовича.

При расчете магнитного поля получаемое в методе Ньютона — Канторовича на каждом шаге линейное уравнение для каждого узла  $ij$  может либо сохранять «пятиточечную» структуру, и тогда изложенные выше методы применяются без всяких изменений, либо иметь «девятиточечную» структуру, когда в линейное уравнение для каждого узла  $ij$  входят, кроме потенциала этого узла, еще восемь потенциалов соседних узлов. В этом случае для определения потенциала на горизонтали  $i+1$  по известным потенциалам на горизонталях  $i$  и  $i-1$  (совершения марша от  $i-1$ , к  $i+1$ ) необходимо решить систему из  $M$  уравнений ( $M$  — число узлов по горизонтали) с трехдиагональной матрицей; это решение получается методом прогонки. В остальных алгоритмах изложенных выше методов исключения и декомпозиции остаются без изменения. Количество неизвестных потенциалов в уравнении для каждого узла (пять или девять) определяется принятым методом вычисления составляющих индукции в окрестностях этого узла.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпов А. М., Нэмени Т. М. Численный метод расчета магнитных полей с помощью исключения внутренних точек области. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1978, № 3.
2. Нэмени Т. М., Никольский А. И. К вопросу о расчете магнитного поля методом исключения внутренних точек. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1979, № 3.
3. Kamal K. B., Mohan K. K., Sankar K. Symmetric marching technique for the poisson equation. I. Dirichlet boundary condition. — Applied Mathematics and Comput., 1984, vol. 15, N 2.
4. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980.
5. Нэмени Т. М. Расчет магнитного поля в активной зоне гидрогенератора для целей диагностики с помощью метода исключения. — Промышленность Армении, 1984, № 10.
6. Капорин И. Е. Маршевый метод для систем с блочно-диагональной матрицей. — В кн.: Численные методы линейной алгебры. М.: Из-во МГУ, 1982.
7. Калиткин Н. Н. Численные методы. — М.: Наука, 1978.
8. Бухгольц Г. Расчеты электрических и магнитных полей. — М.: Иностран. лит-ра, 1961.

[01.09.86]



# Диагностирование неисправностей электроэнергетических машин при межфазных замыканиях в обмотке статора

ГАШИМОВ М. А., ГУСЕЙНОВ А. М.

Азербайджанский институт нефти и химии им. М. Азизбекова

В условиях эксплуатации различные неисправности электроэнергетических машин становятся причиной возникновения аварийных ситуаций и нарушений ответственных технологических процессов на электрических станциях и в узлах нагрузки. Поэтому своевременное диагностирование неисправностей технического состояния является одним из основных факторов обеспечения безаварийного режима работы и эффективности функционирования этих машин. Основная трудность в решении данной актуальной задачи заключается в том, что пока не определены специальные информационные параметры или признаки (диагностические параметры), характеризующие соответствующие изменения в техническом состоянии при возникновении отдельных неисправностей и на основе которых можно было бы создать методы и средства диагностики машин.

Статья посвящена результатам экспериментального исследования межфазного замыкания в обмотке статора асинхронных электрических машин с целью определения информативных диагностических параметров, характеризующих изменение свойств процессов функционирования в зависимости от указанной неисправности и рассмотрения возможности использования их для контроля технического состояния машин в процессе работы.

Как известно, указанные электрические машины широко используются на электрических станциях и в узлах нагрузки энергосистемы. Практика эксплуатации их показывает, что межфазное замыкание — наиболее часто встречающаяся и опасная неисправность обмотки статора, явными признаками которой являются появление местных нагревов в обмотке, нарушение симметрии фазных токов, понижение крутящего момента, «гудение» (высокий уровень шума), вибрации и др. [1]. Все говорит о том, что межфазное замыкание оказывает влияние на параметры электромагнитных, механически-вибрационных и акустических процессов машины.

Эффективность процедуры определения неисправностей технического состояния машины в процессе ее работы требует, чтобы контролируемый диагностический параметр, кроме информативности, был и легко доступным для измерения. Сравнительно доступными для измерения могут быть, например, параметры вибрационных и акустических процессов, которые в большей степени являются следствием электромагнитных процессов и, как известно из теории электрических машин, главным образом обусловлены временными и пространственными изменениями магнитных сил, действующих между отдельными частями машины. При этом между статором и ротором могут возникнуть радиальные силы, изменяющиеся в пространстве подобно волнам разных порядков. В общем случае эти радиальные волны могут быть выражены так [2]:

$$P_{rv} = A_v \cos(\nu\alpha - \Omega_v t), \quad (1)$$

где  $\nu = 1 \div \infty$ ;  $\Omega_v$  — угловая частота силы порядка  $\nu$ .

Механические колебания ротора и корпуса, вызванные радиальными силами, перпендикулярны продольной оси машины. Тангенциальные силы, вызывающие колебания по продольной оси, обусловлены линейной нагрузкой в машине. Из теории машины известно, что влияние тангенциальных сил проявляется только при выполнении условия [3]:

$$\nu = \mu \pm 1. \quad (2)$$

Увеличению радиальных сил способствуют тангенциальные силы, если порядок статорной гармоники на единицу ниже порядка роторной ( $\mu$ ). При  $\nu = \mu + 1$  тангенциальные силы ослабляют амплитуду радиальных сил. Таким образом, при заданных условиях главной причиной вибраций в машине являются радиальные силы. Причины появления механических колебаний от неуравновешенных магнитных притяжений, которые воспринимаются и как шум машины, а также факторы, влияющие на природу этих явлений, в том числе электрической несимметрии обмотки статора, подробно рассматриваются в [2, 3].

Очевидно, межфазное замыкание, создавая электрическую несимметрию в обмотке статора, обуславливает появление дополнительных пространственных высших гармоник, так как при этом нарушается симметрия магнитного потока фаз. Высшие пространственные гармоники создают дополнительные вибра-

ционные усилия в сердечнике и других конструктивных частях машины. Обусловленные вибрационными усилиями высших пространственных гармоник механические колебания вызовут соответствующие акустические колебания в спектре шума, издаваемого сердечником и другими конструктивными частями машины; как следствие этого, появляются указанные признаки неисправности. Однако явное проявление этих признаков имеет место только в период окончательного выхода из строя работающей машины. На начальных стадиях возникновения повреждений для обнаружения признаков нарушения процессов функционирования машины необходимо выполнить определенные целенаправленные действия по диагностированию.

Для экспериментального подтверждения изложенных положений и получения данных, характеризующих влияние межфазного замыкания в обмотке статора на параметры электромагнитных, вибрационных и акустических процессов, была разработана методика. Сущность ее заключается в том, что, создавая межфазное замыкание искусственно, определяем и анализируем свойства динамических проявлений электромагнитных, вибрационных и акустических процессов в машине.

Искусственное замыкание между различными фазами в обмотке статора создается с помощью специальных проводов, предварительно выведенных наружу из лобовой части обмотки. Для имитации переходного сопротивления в точке замыкания эти провода замыкаются через регулируемое активное сопротивление, позволяющее также регулировать значение тока в короткозамкнутом контуре и получать неисправности различной степени. Эксперименты проводились как на эксплуатируемых, так и на модельных машинах.

Некоторые данные, характеризующие изменение вибрационных параметров в зависимости от межфазного замыкания в асинхронных машинах приводятся в табл. 1 и 2; данные получены для вертикальной (В), поперечной (П) и осевой (О)

Таблица 1

Режим холостого хода	Вибрационные параметры* в различных точках корпуса асинхронной машины типа 4А90L (замыкаются фазы А и С)									
	Вибросмещение, мкм			Скорость, мм/с			Ускорение, м/сек <sup>2</sup>			
	В	П	О	В	П	О	В	П	О	
Неисправность отсутствует	50	40	50	0,2	0,24	0,3	1,5	0,7	1,5	
Неисправность задана; ток в короткозамкнутом контуре:	1 А	60	45	60	0,5	0,28	0,5	3,4	1,2	2,8
	5 А	95	95	85	2,8	1,0	2,0	10,0	5,0	10,0
	10 А	100	100	100	6,0	2,0	4,0	22,0	10,0	20,0

Таблица 2

Режим	Вибрационные параметры в вертикальной точке корпуса асинхронной машины типа А160МОЧ (замыкаются фазы А и С)		
	Вибросмещение, мкм	Скорость, мм/с	Ускорение, м/сек <sup>2</sup>
Неисправность отсутствует	45/100*	2/3	4/5
Неисправность задана; ток в короткозамкнутом контуре:	15 А	55/120	3,5/4,0
	30 А	60/150	4,6/5,3
	40 А	80/190	6,2/6,5
			6,0/6,5 9,0/9,2 11,0/11,5

Примечание. В числителе приведены данные для режима х. х. ( $I = 0$ ); в знаменателе — для режима нагрузки ( $I = I_n$ )

точек корпуса машины. Данные, характеризующие изменения акустических параметров (уровня шума) в этих машинах при указанной неисправности, приводятся в табл. 3.

При измерении параметров одновременно проводилось также их осциллографирование в идентичных условиях и одинаковом масштабе. На рис. 1 и 2 приводятся осциллограммы вибрационного ускорения в асинхронном электродвигателе типа А160МОЧ соответственно в режиме холостого хода и нагрузки. Характер изменения других вибрационных параметров такой же и усугубляется по мере увеличения тока в короткозамкнутом контуре, т. е. при увеличении степени возмущения неисправности. На рис. 3 приводятся осциллограммы уровня шума при отсутствии и наличии неисправности, снятые в режиме холостого хода асинхронного двигателя (А160МОЧ).

Экспериментальные данные показывают, что межфазное замыкание в обмотке статора приводит к заметному увеличению параметров вибрационных и акустических процессов, особенно вибрационного ускорения. Следовательно, их можно использовать в качестве диагностических параметров для контроля технического состояния машины в процессе ее работы.

Непосредственное измерение названных параметров в условиях эксплуатации не представляет трудностей и не требует больших затрат. При контрольных измерениях выход значений параметров за предел порога (допуска) может служить предупреждением о возникновении неисправности в машине. В качестве предела допуска могут быть использованы значения, установленные ГОСТ для вибрационных и акустических параметров соответствующих классов электрических машин, или же значения, определяемые в условиях эксплуатации для исправного состояния машины.

Неисправности технического состояния машины в процессе ее работы могут быть определены также анализом кривых изменения диагностических параметров, снятых путем осциллографирования или регистрации флуктуации их во времени. Сравнивая их с аналогичными, характеризующими исправное техническое состояние (эталонными), можно судить о возникающей неисправности в машине [4].

Для обработки данных при оценке текущего технического состояния машины могут быть использованы также простые методы топологии или аналитической геометрии [5].

В качестве примера на рис. 4 показано изменение границы значений вибрационного ускорения (обработка реализаций рис. 1 проведена в долях относительных величин осциллографированного параметра). Для наглядности границы показаны прямыми линиями, проведенными параллельно оси времени из точек положительного и отрицательного отклонений в осциллограмме (здесь  $l$  — максимальный размах выбросов). Границы, характеризующие исправное техническое состояние, могут быть приняты в качестве допуска (эталона).

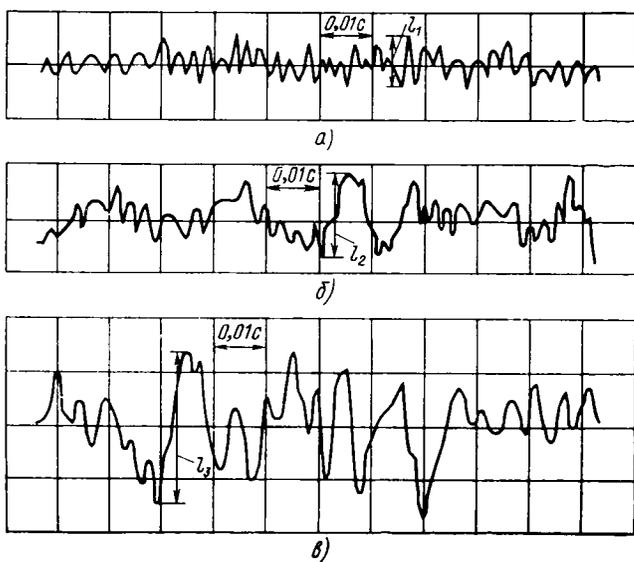


Рис. 1. Осциллограмма вибрационного ускорения в режиме холостого хода:

*a* — неисправность отсутствует; *б* — неисправность задана (ток в к. з. контуре равен 15 А); *в* — неисправность задана (ток в к. з. контуре равен 40 А)

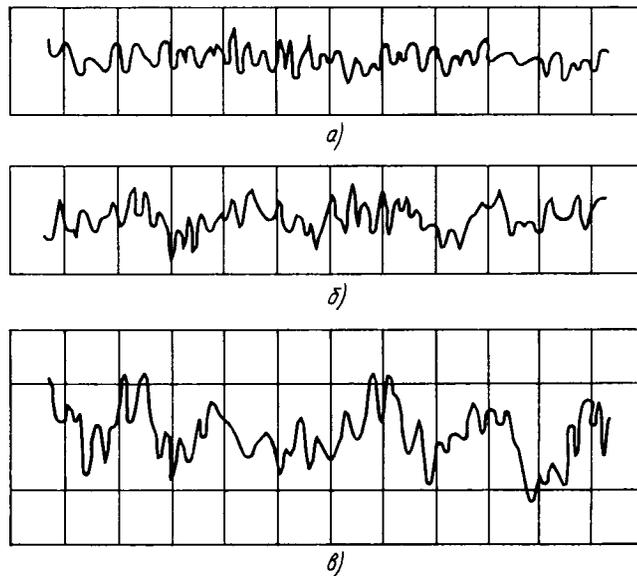


Рис. 2. Осциллограмма вибрационного ускорения в режиме нагрузки:

*a* — неисправность отсутствует; *б* — неисправность задана (ток в к. з. контуре равен 15 А); *в* — неисправность задана (ток в к. з. контуре равен 40 А)

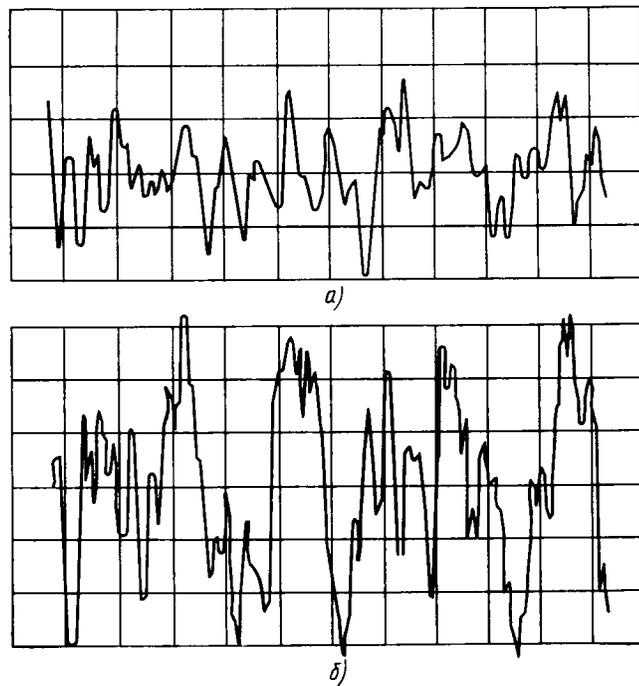


Рис. 3. Осциллограмма уровня шума в режиме холостого хода: *a* — неисправность отсутствует; *б* — неисправность задана (ток в к. з. контуре равен 40 А)

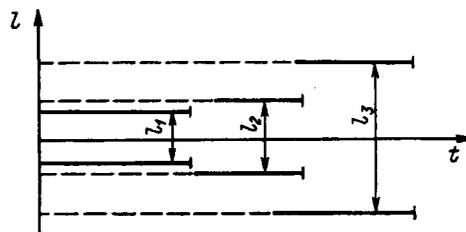


Рис. 4. Границы колебаний вибрационного ускорения:  $l_1$  — размах колебания при отсутствии неисправности;  $l_2$  — тоже при токе к. з. в контуре 15 А;  $l_3$  — то же при токе в к. з. контуре 40 А

Из (1) и приведенных осциллограмм рис. 1—3 видно, что вибрационные колебания, а также обусловленный ими шум в электрических машинах по своему спектральному составу в основном имеют гармонический характер.

В этом случае скорость, ускорение и уровень шума являются важными параметрами гармонического движения. Можно показать, что тригонометрической интерполяцией функций этих параметров (полученных реализаций) является известный тригонометрический многочлен вида:

$$F_N(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^N (a_k \cos kx + b_k \sin kx), \quad (3)$$

так как с возрастанием  $N$  многочлен  $F_N/x$  аппроксимирует заданную функцию диагностических параметров. Это позволяет определить числовые характеристики изменения реализаций и использовать их для диагностики неисправностей технического состояния машины.

Для получения некоторых числовых данных, характеризующих изменение предложенных диагностических параметров, кривые их реализаций, предварительно заданные таблицей, были разложены в ряд Фурье.

Таблица 3

Режим	Изменение уровня шума, дБ, для различных режимов работы		
	$I=0$	$I=0,5$	$I=I_H$
Неисправность отсутствует <sup>1</sup>	65/58	70/57	74/—
Неисправность задана; ток в короткозамкнутом контуре: для машины типа ЧА90Л			
1 А	69	72	83
5 А	77	78	84
10 А	83	84	86
для машины типа А160МЧ			
15 А	69	60	—
30 А	72	64	—
40 А	76	72	—

<sup>1</sup> В числителе — данные для машины типа ЧА90Л, в знаменателе — для машины типа А160МЧ

Для вычисления коэффициентов  $a_k, b_k$  тригонометрического интерполяционного многочлена (3) использовалась подпрограмма FORIT, которая включена в состав стандартного математического обеспечения ЕС ЭВМ.

В качестве примера в табл. 4 приведены коэффициенты, вычисленные для осциллограмм вибрационного ускорения (рис. 1). Как видно из данных табл. 4, по мере усиления степени неисправности абсолютные значения коэффициентов имеют тенденцию к увеличению.

Особенно очевидным является существенное увеличение суммы абсолютных значений (модулей) вычисленных коэффициентов. При этом, определяя разницу между суммами абсолютных значений коэффициентов как

$$\Delta a = \sum_{k=1}^N a_{kt} - \sum_{k=1}^N a_{kH}, \quad (4)$$

можно оценить неисправность технического состояния машины. Здесь  $\sum a_{kH}$  сумма абсолютных значений коэффициентов, вычисленных из реализаций, характеризующих нормальное (эталонное) техническое состояние;  $\sum a_{kt}$  — сумма значений коэффициентов, вычисленных из реализаций, полученных во время диагностики текущего состояния машины.

Увеличение указанной разницы будет свидетельствовать о появлении неисправности в техническом состоянии работающей машины.

В ходе экспериментальных исследований производился также гармонический анализ спектра измеряемых величин и определено влияние межфазного замыкания в обмотке статора на гармонический состав спектра вибрационных и акустических процессов машины. В качестве примера в табл. 5 приводится небольшая часть гармоник, выделенных из спектра вибрационного ускорения в точке В корпуса машины 4А90Л.

Наиболее чувствительной к исследуемой неисправности оказалась гармоника с частотой 900 Гц. Как видно из табл. 5, если значение данной гармоники при отсутствии неисправности составляло 0,04 м<sup>2</sup>/с, то при наличии неисправности оно равняется 1; 2,5; 5,5 при токах в короткозамкнутом контуре соответственно 1; 5; 10А. Было также установлено, что если при

Таблица 5

Гармоника, Гц	Значения вибрационного ускорения, м <sup>2</sup> /с, в вертикальной точке корпуса машины типа 4А90Л			
	неисправность отсутствует	неисправность задана; при различном токе в короткозамкнутом контуре		
		1 А	5 А	10 А
25	1,5	3,4	10	22
100	0,055	0,05	0,07	0,07
300	0,13	0,20	0,19	0,19
800	0,03	0,03	0,035	0,037
900	0,10	0,90	1,20	1,50
1400	0,04	1,00	2,50	5,50
	0,15	0,10	1,20	1,30

Таблица 4

Режим	Значения коэффициентов ряда Фурье (для кривых рис. 1)																			
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$\sum_{k=1}^N a_k$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_9$	$\sum_{k=1}^N b_k$
Неисправность отсутствует	-1,58	-1,89	2,43	-8,31	-0,41	5,81	7,63	3,29	-2,16	33,51	4,39	-0,74	-3,35	4,24	1,07	7,26	4,53	5,75	0,16	31,49
Неисправность задана; ток короткозамкнутого контура																				
15 А	11,29	7,51	14,23	8,70	4,91	9,07	15,8	15,88	19,82	106,91	4,11	2,74	2,54	18,40	14,42	13,29	20,76	6,84	6,42	89,52
40 А	3,39	15,67	11,83	25,26	20,09	45,59	22,05	24,62	25,63	192,13	2,98	30,93	18,9	1,13	51,98	13,3	13,8	16,11	26,21	173,34

отсутствии исследуемой неисправности в спектрах вибрационной скорости и вибрационного ускорения преобладают низкочастотные составляющие, то при ее возникновении преобладают сравнительно высокочастотные составляющие. Эти последние данные могут быть очень полезными при распознавании типа неисправностей, если соответствующие разнотипные диагностические параметры будут экспериментально определены и для других неисправностей машины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гемке Р. Г. Неисправности электрических машин — Л.: Энергия, 1975
2. Костенко М. П. Электрические машины. — М., Л.: ГЭИ, 1949.
3. Геллер Б., Гамата В. Дополнительные поля, моменты и потери мощности в асинхронных машинах. — М., Л.: Энергия, 1964.
4. Гашимов М. А., Аскеров Н. А. Выявление неисправности стержней ротора асинхронных электродвигателей. — Электрические станции, 1984, № 8.
5. Павлов Б. В. Кибернетические методы технического диагноза. — М.: Машиностроение, 1966

[29.09.86]

УДК 621.314.26.001.5

## Влияние угла инвертирования непосредственного преобразователя частоты на режим вытеснения вентильной группы

ПАВЛОВИЧ С. Н., канд. техн. наук

Белорусский политехнический институт

Одной из перспективных систем электропривода переменного тока с асинхронным двигателем (АД), обладающей хорошими технико-экономическими показателями, является система электропривода на основе непосредственного преобразователя частоты (НПЧ) с естественной коммутацией, раздельным управлением группами вентиляей и прямоугольным законом управления. Особенностью работы таких НПЧ на АД и на активно-индуктивную ( $RL$ ) нагрузку при непрерывном токе является возможность возникновения аномального режима, называемого вытеснением одной вентильной группы преобразователя.

В [1] получено математическое условие границы двух устойчивых режимов работы НПЧ (режима нормальной работы и режима вытеснения одной вентильной группы), которое учитывает реальную форму кривых тока и напряжения на эквивалентной  $RL$ -нагрузке, позволяет производить исследование влияния различных параметров системы электропривода на возникновение данного аномального режима работы преобразователя. Это условие имеет следующий вид:

$$\frac{\ln [1 - Hi_{II}(0)]}{B} - \frac{2\pi\gamma - \lambda_{II}}{\lambda} + N = 0, \quad (1)$$

где  $\gamma = f_1/f_2$  — соотношение частот на входе ( $f_1$ ) и выходе ( $f_2$ ) преобразователя;  $\lambda = 2\pi/m$  — интервал пульсации;  $m$  — пульсность выпрямления, характеризующая силовую схему НПЧ;  $\lambda_{II} = \pi + \lambda - \alpha - \beta$ ;  $\alpha, \beta$  — соответственно углы выпрямления и инвертирования;  $N$  — целая часть выражения  $\left(\frac{\pi\gamma - \psi}{\lambda}\right)$ ;  $\psi$  — угол сдвига прямоугольного сигнала напряжения управления НПЧ;  $B = \lambda \operatorname{ctg} \varphi$ ;  $\varphi$  — фазовый угол эквивалентной  $RL$ -нагрузки при частоте  $f_1$ ;

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega_1 L}{R}; \quad \omega_1 = 2\pi f_1;$$

$$i_{II}(0) = C + A_{вe} e^{-D} \frac{1 - e^{-BN}}{1 - e^{-B}};$$

$$H = \frac{1 - e^{-B}}{A_{и}}; \quad D = \lambda_{II} \operatorname{ctg} \varphi;$$

$$A_{в} = I_m [\sin(\lambda + \theta_{в} - \varphi) - \sin(\theta_{в} - \varphi) e^{-B}];$$

$$A_{и} = I_m [\sin(\lambda + \theta_{и} - \varphi) - \sin(\theta_{и} - \varphi) e^{-B}];$$

$$C = I_m [\sin(\lambda_{II} + \theta_{в} - \varphi) - \sin(\theta_{в} - \varphi) e^{-D}];$$

$$\theta_{в} = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} + \alpha; \quad \theta_{и} = \frac{3}{2} \pi - \frac{\pi}{m} - \beta;$$

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega_1 L)^2}};$$

$U_m$  — амплитудное значение напряжения питающей сети НПЧ.

Левая часть уравнения (1) представляет собой сложную мате-

матическую функцию от параметров цепи нагрузки  $R$  и  $L$ , углов управления  $\alpha, \beta, \psi$ , соотношения частот  $\gamma$  и пульсности выпрямления преобразователя  $m$ . Влияние параметров системы электропривода  $m, \gamma, \psi, \alpha, R$  и  $L$  на возникновение аномального режима работы НПЧ, вызванного вытеснением из работы одной вентильной группы, уже исследовано [1 и 2].

Так как в частотно-регулируемом электроприводе на основе НПЧ с прямоугольным законом управления регулирование выходного напряжения преобразователя в функции частоты осуществляется обычно изменением угла выпрямления  $\alpha$  при постоянном угле инвертирования  $\beta$ , представляет интерес выявить влияние угла  $\beta$  на режим вытеснения одной вентильной группы. С этой целью, используя уравнение (1), на ЦВМ были выполнены расчеты по определению границ режима вытеснения в координатах угла  $\alpha$  и косинуса угла сдвига основной гармоники тока нагрузки относительно основной гармоники выходного напряжения преобразователя ( $\cos \varphi_2$ ) для различных значений  $\beta$  и одинаковых заданных значениях других параметров ( $m, \gamma, \psi$ ). При этом угол  $\varphi$ , необходимый для определения некоторых величин уравнения (1), вычислялся из выражения

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 - \gamma^2 + (\gamma/\cos \varphi_2)^2}}, \quad (2)$$

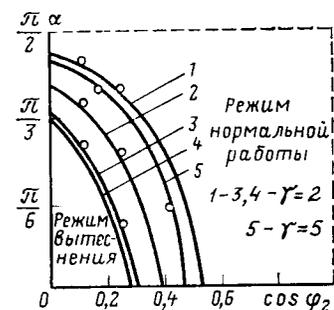
полученного на основе известной [3] зависимости  $\cos \varphi_2$  от параметров  $R$  и  $L$  цепи нагрузки:

$$\cos \varphi_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_2 L/R)^2}}, \quad (3)$$

где

$$\omega_2 = 2\pi f_2 = 2\pi f_1/\gamma.$$

Результаты расчета на ЦВМ представлены на рисунке в виде кривых границ двух областей устойчивой работы НПЧ. С целью проверки достоверности полученных кривых были про-



Границы двух областей устойчивой работы НПЧ при  $\psi=0, m=3$  и различных значениях угла инвертирования  $\beta = \text{const}$  1 —  $\beta = 4/9 \pi$ ; 2 —  $\beta = 1/3 \pi$ ; 3 —  $\beta = 1/6 \pi$ ; 4 —  $\beta = 0$ ; 5 —  $\beta = 4/9 \pi$

ведены некоторые экспериментальные исследования на лабораторной установке нулевого НПЧ с прямоугольным законом управления. Для этого на выход НПЧ подключалась активно-индуктивная нагрузка с определенными значениями индуктивности  $L$  и активного сопротивления  $R$ , устанавливались конкретные значения частоты  $\omega_2$ , угла  $\beta$ , а затем изменяли угол  $\alpha$  (от большого значения в сторону уменьшения), наблюдая при этом кривую фазового тока нагрузки на осциллографе, до момента, когда ток становился однополярным, т. е. когда наступал режим вытеснения из работы одной вентиляльной группы преобразователя. Измерив угол  $\alpha$  и рассчитав по (3) значение  $\cos \varphi_2$  для соотношения общих (с учетом индуктивности и активного сопротивления самого преобразователя) индуктивного и активного сопротивлений одной фазы цепи нагрузки, получим координаты экспериментальной точки границы двух областей устойчивой работы НПЧ. На рисунке данные экспериментальных исследований по указанной методике нанесены в виде точек, эти данные достаточно хорошо подтверждаются расчетами на ЦВМ.

Из анализа результатов выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. С уменьшением угла инвертирования  $\beta$  область режима вытеснения одной вентиляльной группы НПЧ уменьшается и рас-

ширяется за счет этого область режима нормальной работы преобразователя.

2. Режим вытеснения одной вентиляльной группы НПЧ наиболее вероятен на верхних частотах выходного напряжения преобразователя, при малых нагрузках (тогда  $\cos \varphi_2$  мал) и больших значениях угла  $\beta$ .

3. С целью расширения области нормальной работы системы частотно-регулируемого электропривода на основе НПЧ целесообразно угол инвертирования  $\beta$  в системе управления преобразователем устанавливать минимально возможным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлович С. Н. Анализ непосредственного преобразователя частоты в режиме неполной работы вентиляльных групп. — Электричество, 1984, № 5.
2. Белоновский В. А., Пар И. Т. Способы устранения режима вытеснения в асинхронном электроприводе с непосредственным преобразователем частоты — Электротехника, 1978, № 7.
3. Быков Ю. М. Непосредственные преобразователи частоты с автономным источником энергии. — М.: Энергия, 1977. [23.09.86]



УДК 621.318.124:538.213

## Дифференциальные и статические параметры в расчетах электромагнитных полей

ЧАБАН В. И., канд. техн. наук

Львовский политехнический институт

Установление количественной взаимосвязи между векторными или интегральными электромагнитными величинами неизбежно приводит к понятию параметров. В нелинейной электротехнике используют два вида параметров — статические и дифференциальные. Статья посвящена выяснению взаимосвязи между ними, в частности, между магнитными проницаемостями ферромагнитной среды.

Взаимосвязь вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  и вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$  в нелинейной анизотропной ферромагнитной безгистерезисной среде имеет вид

$$\vec{B} = M' \vec{H}, \tag{1}$$

где  $M'$  — матрица магнитных статических проницаемостей.

В главных осях анизотропии эта матрица имеет диагональный вид [1]:

$$M' = \text{diag} (\mu'_x, \mu'_y, \mu'_z). \tag{2}$$

Мы предлагаем вычислять элементы этой матрицы по кривым намагничивания среды в направлении главных осей

$$B^i = B^i(H), \quad i = x, y, z, \quad H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} \tag{3}$$

следующим образом:

$$\mu'_i = B^i/H. \tag{4}$$

Диагональный вид матрицы (2) не должен создавать ложного представления о независимости магнитных состояний по отдельным осям. Эта зависимость скрыта в ее элементах, являющихся согласно (3), (4) функциями всех компонент вектора  $\vec{H}$ .

В изотропной среде матрица (2) вырождается в скаляр:

$$M' = \mu', \tag{5}$$

где  $\mu'$  — статическая магнитная проницаемость.

В неглавных осях матрица (2) будет заполненной за счет поворота координат. В главных осях она заполнена лишь в гирозффективных средах, например, в ферритах.

Взаимосвязь приращений векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  в нелинейной безгистерезисной анизотропной ферромагнитной среде имеет вид:

$$d\vec{B} = M'' d\vec{H}, \tag{6}$$

где  $M''$  — матрица дифференциальных магнитных проницаемостей.

В отличие от  $M'$  матрица  $M''$  всегда заполнена. Выведем вы-

ражение ее  $ik$ -го элемента. Так, согласно (1), (2) имеем

$$B_i = \mu'_i H_i. \tag{7}$$

Дифференцируя (7) по  $H_k$ , получаем

$$\mu''_{ik} = \frac{\partial B_i}{\partial H_k} = \frac{\partial \mu'_i}{\partial H_k} H_i + \mu'_i \frac{\partial H_i}{\partial H_k}, \quad i, k = x, y, z. \tag{8}$$

С учетом (3), (4) находим

$$\frac{\partial \mu'_i}{\partial H_k} = (\mu''_i - \mu'_i) H_i/H^2, \tag{9}$$

где  $\mu''_i$  — дифференциальная магнитная проницаемость в направлении  $i$ -й главной оси;

$$\mu''_i = dB^i/dH. \tag{10}$$

Подставляя (9) в (8), имеем окончательно

$$\mu''_{ik} = K_{ik} \mu'_i + (\mu''_i - \mu'_i) H_i H_k / H^2. \tag{11}$$

где  $K_{ik}$  — символ Кронекера, он равен единице, если  $i = k$ , и нулю, если  $i \neq k$ .

В изотропной среде (11) сводится к известному выражению [2]:

$$\mu''_{ik} = K_{ik} \mu' + (\mu'' - \mu') H_i H_k / H^2, \tag{12}$$

где  $\mu'$ ,  $\mu''$  — статическая и дифференциальная магнитные проницаемости.

Выражения (4), (5) намного проще соответствующих выражений (11), (12).

Расчет переходных и установившихся процессов в ферромагнитных средах осуществляют обычно используя (2). Потребность в (6) появляется крайне редко, например, в квазиытоновских итерациях, где требуется вычисление якобиана системы. Ввиду чрезмерной сложности практической реализации таких циклов их применение может быть оправдано лишь в задачах ускоренного поиска стационарных процессов, позволяющих находить пространственно-временное распределение электромагнитного поля на периоде. В последнее время такие алгоритмы нами разработаны. Известные решения позволяют лишь определить пространственное распределение стационарного поля в фиксированный момент времени.

Выражение (1) дает большую информацию о процессе, чем (6). Известны задачи, в которых выражение (6) в отличие от (1) неприменимо. Так, определение электромагнитных сил может быть осуществлено лишь при использовании статических параметров [3]. Доказательство в [2] неопределенности матрицы (2) в нелинейных средах и неправомерности его пользования лишено малейшей математической основы, поскольку оно базируется на искусственно построенной недоопределенной системе алгебраических уравнений.

Использование  $M''$  особенно усложняет расчет характеристик слоистой ферромагнитной среды, так как требует искусственного дифференцирования друг по другу векторов магнитного поля эквивалентной сплошной анизотропной среды и последующего численного интегрирования по отдельным компонентам одного из них [4]. В результате чего операции аналитического дифференцирования и численного интегрирования взаимно исключают друг друга. При этом теряется лишь точность.

В области статических магнитных проницаемостей решение этой задачи намного проще [5]: перерасчет характеристики ферромагнетика в характеристики эквивалентной сплошной среды производят исходя из последовательного и параллельного соединения магнитных сопротивлений магнитного и немагнитного слоев вдоль главных осей анизотропии.

Использование дифференциальных магнитных проницаемостей не приводит к усложнению расчета лишь в одномерных пространственных задачах и то при пользовании явными численными методами теряется точность. Покажем это на примере расчета квазистационарного электромагнитного поля в тонкой пластине. Простейшие конечно-разностные временные схемы запишем по-разному:

$$H(t + \Delta t) = \frac{\Delta t}{\mu''(t)} \frac{1}{\gamma} \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}(t) + H(t); \quad (13)$$

$$B(t + \Delta t) = \frac{\Delta t}{\gamma} \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}(t) + B(t); \quad H(t + \Delta t) = B(t + \Delta t) / \mu'(t + \Delta t). \quad (14)$$



УДК 621.318.5.042.001.24

## Результаты исследования магнитной проводимости рассеяния плоских магнитопроводов

ЗЕКЦЕР Д. М., канд. техн. наук

Плоские магнитные системы (ПМС) широко применяются для электромагнитных реле управления контроля и сигнализации. Достоинства ПМС: двухэлементная конструкция магнитопровода (якорь и сердечник) вместо трехэлементной классической системы (якорь, сердечник и ярмо); отсутствие паразитных воздушных зазоров; технологическая простота изготовления — все детали штампованы; возможность выполнения модификации для печатного монтажа.

Однако в известной технической литературе отсутствуют данные о результатах исследования ПМС с целью выявления условия минимальных магнитных проводимостей для потоков рассеяния, что необходимо для разработки высокочувствительных (по м. д. с. и мощности срабатывания) реле. На рис. 1 приведена III-образная ПМС, имеющая следующие трубки магнитных проводимостей утечки:

$G_1$  — магнитная проводимость утечки между боковыми вертикальными плоскостями среднего и бокового сердечника;

$G_2$  — магнитная проводимость участка магнитной цепи в виде полуцилиндра между гранями среднего и бокового сердечника;

$G_3$  — магнитная проводимость участка магнитной цепи в виде полого полуцилиндра между горизонтальными плоскостями среднего и бокового сердечника;

$G_4$  — торцевая магнитная проводимость участка магнитной цепи в виде полуцилиндра между вертикальными гранями среднего и бокового сердечника;

$G_5$  — торцевая магнитная проводимость участка магнитной цепи в виде полого полуцилиндра между торцевыми плоскостями;

Сравнивая (13) и (14), видим, что одно и то же значение  $H(t + \Delta t)$  в первом случае получаем исходя из состояния магнитопровода в момент времени  $t [\mu''(t)]$ , а во втором — в момент  $t + \Delta t [\mu'(t + \Delta t)]$ . Временные разбросы значения вектора  $\vec{H}$  и соответствующего ему магнитного состояния сопряжены с накоплением дополнительных ошибок численного интегрирования.

**Выводы.** 1. Статические параметры обладают более широкими возможностями, чем дифференциальные. Решаемый на их основе круг задач шире.

2. В теории электромагнитного поля численный анализ на основе статических параметров проще, точность решения выше.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов-Смоленский А. В. Условия физического подобия квазистационарных электромагнитных полей в ферромагнитных средах. — Изв. АН. СССР. Энергетика и транспорт, 1965, № 4.
2. Фильц Р. В. До теорії електромагнітного поля в нелінійних середовищах. — Вісник Львів. політехн. ін-ту, 1967, № 15.
3. Иванов-Смоленский А. В. Определение электромагнитных сил в нелинейных магнитных системах при малом перемещении. — Электричество, 1985, № 5.
4. Дышовый Р. В., Фильц Р. В., Гаврилюк Р. Б. Расчет магнитной проницаемости и характеристик намагничивания слоистой ферромагнитной среды. — Теоретическая электротехника, 1973, вып. 15.
5. Рытов С. М. Электромагнитные свойства мелкослоистой среды. — ЖТЭФ, 1955, вып. 5.

[22.10.86]

$G_6$  — торцевая магнитная проводимость участка магнитной цепи в виде шарового квадранта.

Очевидно, удельная боковая магнитная проводимость утечки определяется следующим выражением:

$$g_y = 2G_7 + 4G_2 + 4G_3$$

или после подстановки соответствующих выражений<sup>1</sup> имеем

$$g_y = \mu_0 \left[ \frac{2b}{c} + 1,04 + \frac{4}{\pi} \ln \left( 1 + \frac{a}{c} \right) \right],$$

где  $b$  — толщина магнитопровода;  $c$  — расстояние между средним и боковым сердечником;  $a$  — ширина среднего сердечника;  $a/2$  — ширина бокового сердечника;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума.

Для упрощения формулы введем обозначения кратности

$$\tau = \frac{b}{a} \text{ и } n = \frac{c}{a},$$

тогда выражение для  $g_y$  принимает следующий вид:

$$g_y = \mu_0 \left[ \frac{2\tau}{n} + 1,04 + \frac{4}{\pi} \ln \left( 1 + \frac{1}{n} \right) \right].$$

Так как рабочие магнитные потоки проходят в основном через якорь, помимо боковых сердечников, для торцевой маг-

<sup>1</sup> Ступель Ф. А. Электромеханические реле. — Харьков: изд-во Харьковского государственного университета, 1956. — 356 с.

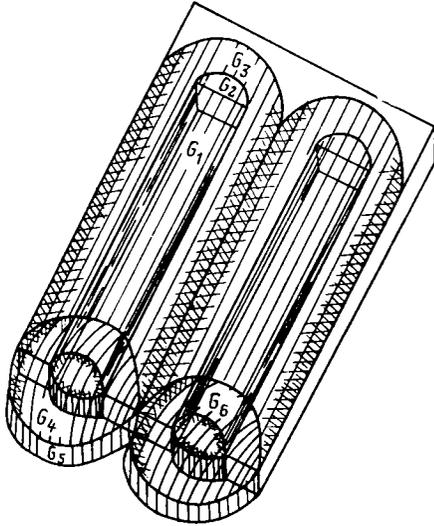


Рис. 1. Эскиз магнитной системы с Ш-образным магнитопроводом с трубками проводимостей

нитной проводимости рассеяния имеем

$$g_T = 2G_4 + 2G_5 + 4G_6$$

или, подставляя соответствующие выражения из книги Ступеля Ф. А., получаем

$$g_T = \mu_0 \left[ 0,52\tau a + \frac{2\tau a}{\pi} \ln \left( 1 + \frac{2a/2}{c} \right) + 4 \cdot 0,077r \right],$$

где  $r = na + 2a/2$ .

После преобразований имеем

$$g_T = \mu_0 a \left( 0,52\tau + \frac{2\tau}{\pi} \ln \left( 1 + \frac{1}{n} \right) + 0,308(n+1) \right).$$

Общая магнитная проводимость рассеяния плоского Ш-образного электромагнитного реле

$$G_p = g_y l + g_T,$$

где  $l$  — длина Ш-образного плоского магнитопровода.

Задаваясь практическими значениями  $\tau$  в диапазоне от 0,1 до 1,0 с шагом 0,1 и  $n$  в диапазоне от 1 до 5 с шагом 0,5, при помощи ЭВМ были построены кривые магнитных проводимостей  $g_y = f(n)$  (рис. 2) и  $g_T = f(n)$  (рис. 3).

Таким образом, накладываемые ограничения обуславливаются минимальной и максимальной толщинами магнитопровода, выполненного из низкоуглеродистой электротехнической стали с учетом реальных возможностей штамповки деталей для реле (толщиной до 6 мм). Расстояние  $c$  между сердечниками и ширина  $a$  основного сердечника (среднего) определяются размерами обмотки для обеспечения необходимой м. д. с. срабатывания при заданной контактной нагрузке. Критерий оптимальности — минимальные значения  $g_y$  и  $g_T$ .

Анализ семейства приведенных кривых позволяет сделать следующие выводы:

боковая магнитная проводимость утечки значительно больше торцевой магнитной проводимости рассеяния, которой для упрощения расчетов можно практически пренебречь;

боковая магнитная проводимость утечки существенно изменяется при  $n \leq 1$ ; дальнейшее увеличение рассеяния  $c$  между

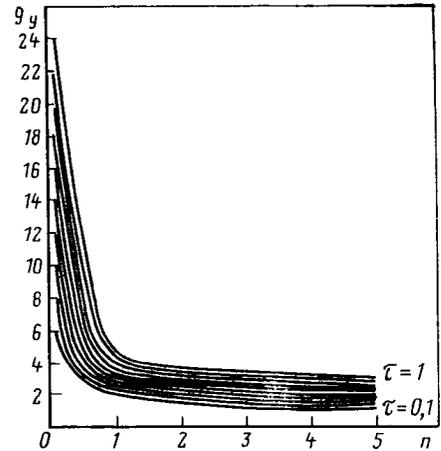


Рис. 2. График удельной проводимости утечки

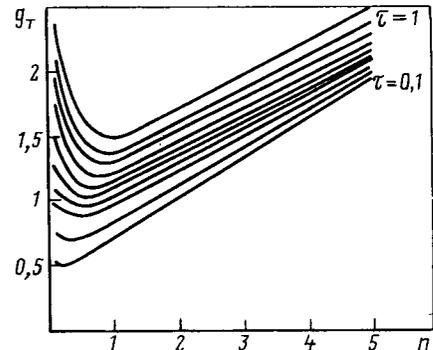


Рис. 3. График торцевой проводимости рассеяния

сердечниками для уменьшения магнитной проводимости утечки экономически неэффективно, так как приводит к увеличению габаритов и массы реле, с другой стороны, магнитная проводимость утечки практически не изменяется;

резкое уменьшение  $g_y$  имеет место до  $c = a$  и поэтому оптимальное решение достигается при равенстве ширины среднего сердечника и расстояния между сердечниками;

торцевая магнитная проводимость имеет минимальное значение при  $c \approx a$ , что еще раз подтверждает оптимальность этого условия.

Экспериментальные данные, полученные в результате испытаний значительного количества макетов Ш-образных плоских магнитопроводов с различными зазорами между средним и боковым сердечниками, полностью подтвердили расчетные и теоретические выводы. Из нагрузочных кривых  $\Delta W_{пр} = f(P)$  (зависимость м. д. с. притяжения якоря от эквивалентной нагрузки на якорь при различных расстояниях  $c$  между средним и боковым сердечником) следует, что магнитная проводимость утечки при  $c > a$  практически не влияет на м. д. с. срабатывания реле в пределах существующих эквивалентных контактных нагрузках до 200 г (десять контактных групп на переключение). Незначительное влияние расстояния  $c$  при нагрузках более 200 г объясняется насыщением магнитной системы в момент срабатывания, что практически для реле не имеет значения. Нагрузочные кривые сняты экспериментально и для различных площадей полюсов сердечников. На базе этих исследований были разработаны и испытаны реле без боковых сердечников для исключения магнитных проводимостей утечек  $g_y$  и  $g_T$ .



## Единая электроэнергетическая система — быть или не быть?

(статья Веникова В. А., «Электричество», 1987, № 3)

ЩЕРБИНА Ю. В.

Большая ценность статьи заключается в том, что на страницах центрального электроэнергетического журнала выносятся остро дискуссионный вопрос, от правильного решения которого будет существенно зависеть эффективность работы Единой электроэнергетической системы (ЕЭС) СССР до и после 2000 г.

Можно сразу же дать однозначный, бесспорный и окончательный положительный ответ на главный вопрос статьи В. А. Веникова. Если исключить гиперболизацию преимуществ и недостатков альтернативных решений, к которой часто прибегают противники научно-технического спора, восполнить взаимный дефицит информации, который испытывают спорящие стороны из-за ограниченного количества опубликованных работ с относительно четким изложением противоположных позиций, и отфильтровать взаимные искажения мнений, то главный вопрос дискуссии приобретает иную трактовку.

Едва ли не первым аргументом противников каких-либо изменений принципов формирования и эксплуатации ЕЭС СССР является ссылка на принципиальные решения плана ГОЭЛРО, сыгравшего важнейшую роль в становлении электроэнергетики СССР. Для начала сформулируем вступительный подвопрос. Будут ли сохраняться впредь все научно-технические принципы, положенные в основу плана ГОЭЛРО, или на каких-то этапах развития жизнь будет заставлять пересматривать *некоторые из них?*

Ответ дают материалистическая диалектика, история развития техники и планы экономического развития СССР. Согласно диалектике любой системе, процессу и явлению присущи противоречия. По мере количественного роста меняются соотношения значимости факторов, в борьбе которых выражаются противоречия, и это приводит к необходимости качественных изменений. Научно-технический прогресс приводит к появлению новых решений, оказывающих дополнительное существенное влияние на количественные и качественные соотношения. В частности, после формирования плана ГОЭЛРО в энергетике появились АЭС и ГАЭС, балансирующая автоматика, линии постоянного тока и многое другое. Долг научного работника, руководителя и инженера — вскрыть объективно существующие противоречия, своевременно определить место и время проведения в системе необходимых изменений с учетом новых научно-технических решений и приложить все силы для преодоления сопротивления этим изменениям, естественно возникающего со стороны авторов и сторонников устаревших представлений.

Необходимость кардинальной перестройки многих устаревших решений в экономике, хозяйственном механизме и технической политике вскрыта на XXVII съезде КПСС. Слишком много накопилось нерешенных противоречий, и в стране развернулась решительная борьба за их преодоление. Весьма высокие требования предъявлены к нам самой жизнью. Невозможно в короткий срок увеличить в два раза экономический потенциал СССР, если не пересмотреть и в необходимых местах самым решительным образом не перестроить техническую политику и хозяйственный механизм. Невозможно преодолеть недостатки развития электроэнергетики СССР, накопившиеся за последние 10—15 лет, если продолжать исходить из незыблемости всех принципов, сформулированных в 1920 г.

Попытаемся провести анализ статьи В. А. Веникова начиная с определения ЕЭС, предложенного в первом абзаце. «Под Единой электроэнергетической системой понимается электрическая часть энергетической системы, имеющая единое техническое и экономическое управление...» Здесь необходимо уточнить, что подразумевается под единым управлением. В плане ГОЭЛРО это можно было представить как прямое управление объектами из единого центра при отсутствии других центров. Однако в послевоенные годы в электроэнергетике СССР (кстати, раньше других развитых стран) утвердилась и доказала свои преимущества иерархическая система, отличающаяся наличием промежуточных центров управления, подчиненных вышестоящему центру, но обладающих определенной автономией. Тенденция к дальнейшему расширению функций, возлагаемых на промежуточные центры, является объективным следствием увеличения объема производства и проявляется сейчас во всех отраслях народного хозяйства СССР, М. С. Горбачев неодно-

кратно отмечал необходимость понять, что далеко не все вопросы управления возможно и целесообразно решать в Москве. Под единым управлением ЕЭС СССР в современных условиях нужно понимать только иерархическое управление.

Фраза заканчивается словами: «...управление обменом энергией как между близлежащими, так и между отдаленными подсистемами, составляющими ЕЭС». Обмен энергией между частями ЕЭС возможен не только при одинаковой (синхронной) частоте. В частности, в [1] на стр. 16 говорится: «Вставка постоянного тока... или электропередача постоянного тока обеспечивает полную развязку объединяемых систем по частоте». Асинхронизированные электромеханические преобразователи частоты (АСЭМПЧ) [2] также обеспечивают возможность автоматического расхождения частот в секциях ЕЭС в нормальных режимах и в аварийных ситуациях. Другое дело, что выбор вариантов синхронной работы либо развязки по частоте с помощью вставок постоянного тока (ВПТ), передач постоянного тока (ППТ) или АСЭМПЧ должен иметь технико-экономическое обоснование.

С учетом сказанного нет необходимости полемизировать с прочими спорными утверждениями в статье В. А. Веникова. Приведем только необходимые для уточнения предмета дискуссии разъяснения позиции сторонников секционирования ЕЭС с помощью ВПТ и ППТ.

1. Качественно новые «неуправляемые» явления нарушений устойчивости синхронной параллельной работы могут возникать в первую очередь в слабых сечениях мощных энергообъединений, входящих в ЕЭС, и в слабых связях между ними. В этом главный аспект проблемы. Если бы можно было создать «равнопрочные» системообразующие сети и эта «равнопрочность» не нарушалась ни в аварийных ситуациях, рассматриваемая проблема была бы значительно менее острой.

2. Проблема слабых сечений и слабых связей проявляется тем сильнее, чем больше выражена неравномерность экономического освоения территории страны и чем длиннее расстояние между районами генерации и потребления электроэнергии. В этом отношении условия развития ЕЭС СССР уникальны и совершенно несопоставимы даже с условиями США, не говоря уже о Франции и других странах. Например, Канско-Ачинский бассейн невозможно перенести в Европейскую часть страны, а большинство населения Европейской части невозможно переселить в Сибирь. Поэтому для СССР требование самобалансирования энергосистем, с помощью которого снижается острота проблемы слабых связей в других странах, станет экономически оправданным разве что после прекращения использования в электроэнергетике органического топлива. Однако и при самобалансирующихся энергосистемах в условиях СССР останутся целесообразными значительные перетоки энергии в широтном направлении, обусловленные сдвигом по времени. Напомним, что с учетом стран СЭВ расстояние, которое должно быть перекрыто такими перетоками, превышает 12 тыс. км.

3. Принципиальное отличие «неуправляемых» явлений в весьма сложных электрических сетях со слабыми сечениями и связями заключается в последовательном развитии каскадного аварийного процесса:

- а) происходит обычное повреждение элемента электрической системы;
- б) в результате отключения поврежденного элемента и последующих действий автоматики оказывается перегруженным какой-то элемент слабого сечения или слабой связи;
- в) в результате отключения этого элемента и новых действий автоматики оказывается перегруженным еще один элемент слабого сечения или слабой связи, и т. д.

Техническая причина «неуправляемости» каскадных процессов заключается в том, что для настройки существующих автоматических устройств необходимо предсказать значения характеристик режима на всех этапах аварийного процесса, а такое предсказание при современной сложности электрических сетей и многообразии эксплуатационных схем и режимов их работы становится практически невозможным. Настройка существующей автоматики на неизвестное течение аварийного процесса оказывается алгоритмически неопределенной задачей.

4. Принятые принципы регулирования режимов [3] при каскадном развитии аварийного процесса неприемлемы по двум причинам.

Во-первых, настройка автоматики, выполненная для определенного сочетания эксплуатационной схемы системообразующей сети и предаварийного режима ее работы, не гарантирует, правильную дозировку управляющих воздействий и, следовательно, не гарантирует ликвидацию аварии при других сочетаниях схем и режимов.

Во-вторых, применение современных принципов балансирующей автоматики приводит к ударам по энергоблокам для экстренного измеряемого долями секунды уменьшения генерации активной мощности и к воздействию на выключатели основной электрической сети для экстренного, также измеряемого долями секунды уменьшения активных нагрузок. Это случается не так уж редко. Энергоблоки, испытавшие несколько таких ударов, приходится выводить в капитальный ремонт, что требует значительных дополнительных затрат и уменьшает располагаемую мощность электростанций ЭЭС. Для аварийного уменьшения нагрузок отключаются крупные узлы электропитания, что приводит к недопустимым народнохозяйственным ущербам.

5. Автоматика рассматриваемого типа может превратиться (и нередко превращается) в источник развития аварийной ситуации по причинам, указанным в п. 4. Кроме того, для балансирующей автоматики, действие которой распространяется на многие объекты на больших расстояниях, резко возрастает вероятность ошибок персонала и отказов оборудования. Например, при выводе в ремонт одной линии 750 кВ для соответствующего изменения схемы действия и настройки существующей автоматики приходится переключать многие десятки накладок в цепях вторичной коммутации на различных объектах, и при каждом таком переключении возможны ошибочные предварительные решения и неправильное исполнение.

6. С целью страховки от перерастания аварийного процесса, начавшегося с отключения слабых связей, в тяжелейшую системную аварию практикой эксплуатации энергообъединений выработан прием аварийного деления ЭЭС на несинхронные части. Это спасает от асинхронного хода и в значительной степени уменьшает алгоритмическую неопределенность настройки балансирующей автоматики, которая при таком подходе должна работать после аварийного деления. Однако этот принцип также неприемлем из-за того, что аварийное деление снимает переток активной мощности от избыточной в дефицитную часть ЭЭС. В результате в избыточной части приходится подвергать экстренной разгрузке больше энергоблоков, а в дефицитной — отключать больше потребителей, и это многократно увеличивает аварийный ущерб.

7. Концепция секционирования ЭЭС с помощью ВПТ и ППТ вовсе не означает стремления разделить ЭЭС СССР на связанные части, самоуправляющиеся исходя из своих местных показателей. Наоборот, она направлена прежде всего на создание технической возможности оптимального взаимодействия секций ЭЭС без негативных явлений, порождаемых стремлением к единой частоте. В частности, при разделении слабой связи вставкой или передачей постоянного тока:

отпадают все неприятности, которые при синхронной работе начинаются с нарушений статической или динамической устойчивости;

предотвращается опасность недопустимых перегрузок элементов слабой связи в аварийных режимах;

нет необходимости в применении балансирующей автоматики, порождающей недопустимые ущербы на электростанциях и у потребителей, — достаточно иметь АРС и АЧР;

нет необходимости в разделении энергообъединений по слабой связи при аварийном возмущении в одном из них;

в любой аварийной ситуации наряду с выходом из строя самой ВПТ сохраняется, однако, заданный переток активной мощности из избыточной в дефицитную секцию, что облегчает автоматическую ликвидацию аварии в каждой из них;

есть возможность дополнительно облегчить ликвидацию аварии путем автоматического увеличения или уменьшения этого перетока.

Именно эти преимущества ВПТ и ППТ в первую очередь имеют в виду сторонники секционирования ЭЭС, когда они говорят о «неуправляемости» существующих режимов и альтернативной «управляемости» ЭЭС в предлагаемом ими варианте решения проблемы слабых связей. ЭЭС СССР в условиях синхронной работы от Владивостока до Ленинграда была бы подобна громадному кораблю, не имеющему защиты от крупных повреждений. Вставки и передачи постоянного тока можно сравнить с переборками, разделяющими отсеки такого корабля.

8. Применение ВПТ или ППТ в слабых связях имеет ряд преимуществ не только в аварийных, но и в нормальных режимах. Главные из них — простота реализации диспетчерского задания на величину перетока и отсутствие народнохозяйственного ущерба в остальных секциях при существенном понижении или повышении частоты в одной из них.

9. Ошибочными являются представления многих специалистов о возможности и даже целесообразности использования ППТ в режиме шунтирования ими синхронных связей переменного тока. Дело в том, что при аварийных возмущениях синхронные связи будут в первую очередь перегружаться, отключаться и порождать каскадные аварии. Можно быть уверенным, что независимо от мнения научных работников и проектных организаций эксплуатационные службы энергообъединений после более или менее длительных попыток эксплуатации ППТ в режиме шунтирования синхронных связей будут переводить их в несинхронный режим.

10. Необходимо внести уточнение в вопрос о «кольцевых перетоках», для преодоления которых предложены ВПТ «третьего направления» [4]. Кольцевые перетоки возникают не из-за ошибок проектирования, а из-за физических свойств контуров, составленных из дальних ЛЭП сверхвысоких напряжений. С другой стороны, в статье В. А. Веникова правильно сказано, что с кольцевыми перетоками можно бороться и другими, причем более дешевыми методами.

Сформулируем теперь три центральных подвопроса дискуссии и попытаемся дать на них хотя бы самые предварительные ответы.

1. Можно ли преодолеть названные выше недостатки существующего развития ЭЭС СССР, не используя вставки и передачи постоянного тока? Теоретически — можно, и даже двумя путями. Первый путь построить такое количество линий переменного тока и обеспечить такую пропускную способность по всем сечениям ЭЭС СССР, чтобы нигде и ни в каких режимах не возникла опасность нарушения устойчивости, перегрузки и отключения синхронных связей. Тогда отпадает необходимость в аварийных делениях и балансирующей автоматике, не будет недопустимых аварийных ущербов. Вопрос только в том, сколько времени и какие затраты потребуются для реализации этого пути. Второй путь — не создавать «равнопрочную» системообразующую сеть, но перекрыть ЭЭС СССР такой кибернетической системой управления, чтобы при крупном аварийном возмущении, например, в Ленинграде строго дозированные (адаптивные) балансирующие воздействия были мгновенно (иначе будет потеряна устойчивость) распределены по территории страны не меньше чем до Экибастуза. Однако здесь вопрос не только в том, сколько времени и затрат уйдет на это. Существенное значение имеет также надежность такой гипотетической системы управления. Дело в том, что надежность датчиков информации, ЭВМ, каналов связи и исполнительной аппаратуры в среднем ниже надежности силовых элементов электрических систем.

2. Имеют ли ВПТ и ППТ право на существование в качестве равноправных с синхронными связями элементов ЭЭС СССР и примыкающих стран? Отвечаем: да, это доказано реальной жизнью. Электроэнергетика СССР имеет все основания гордиться тем, что первая в мире мощная ППТ Волгоград — Донбасс была создана в нашей стране. Успешно работает ВПТ СССР — Финляндия [5], строится ППТ Экибастуз — Тамбов [6], ведутся дальнейшие проектные проработки. В мире в настоящее время работают 12 мощных ВПТ и прогнозируется их бурное развитие [7]. В СССР начата разработка проекта регулируемой единой сети постоянного тока сверхвысокого напряжения, надстроенной над высоковольтной сетью переменного тока [8].

3. В чем же тогда глубинная научно-техническая причина непрекращающихся споров? По нашему мнению — в инженерной ошибке, допускаемой пока даже самыми активными сторонниками ВПТ и ППТ. Например, в [6] сказано буквально следующее: ВПТ и ППТ «... в сочетании со связями на переменном токе повышают управляемость и способствуют экономичности и надежности». Здесь все правильно, если уточнить, в каком смысле понимать термин «в сочетании». Практически во всех публикациях речь идет о синхронном сочетании, а оно должно быть несинхронным с оперативным перемещением точек разграничения секций и ориентировочным допустимым расхождением частот в нормальных режимах  $\pm 0,005$  Гц, а в аварийных режимах — не выше  $\pm 1$  Гц.

Не можем согласиться с утверждением В. А. Веникова о том, что концепция секционирования ЭЭС СССР «иногда достаточно четко постулирована», но «ничем не подтверждена». Соответствующие исследования проведены в 1984—85 гг. в Киевском политехническом институте совместно с Минэнерго

УССР, ОДУ Юга [9] и рядом других организаций. На основании статистики аварийных ущербов обоснована необходимость поиска новых решений в управлении слабыми связями, предложены математические модели развития каскадных аварий, выполнены имитационные эксперименты на ЭВМ для реальной схемы электрической сети ЭЭС Юга во взаимодействии с ЭЭС СЭВ, предложены методы балансирования нагрузок и управления перетоком при несинхронной связи, ведется разработка методов автоматического управления перетоками в несинхронных связях в аварийных ситуациях. Результаты исследований пока не опубликованы, но для этого были свои причины.

Не имея возможности упомянуть в отклике все новые научные результаты, остановимся только на предлагаемых решениях по автоматическому регулированию режимов и по автоматической балансировке активных мощностей в смежных секциях ЭЭС.

В нормальных режимах величины перетоков активной мощности должны задаваться на уровне ЦДУ центральным автоматическим координатором, оптимизирующим режим ЭЭС в целом по критерию расхода энергоресурсов с учетом объективных ограничений. Все ВПТ и ППТ должны иметь автоматические стабилизаторы перетоков, обеспечивающие выполнение заданий ЦДУ. В каждой секции должны функционировать автоматические оптимизаторы распределения активных нагрузок на уровнях ОДУ, задания которых будут обрабатываться исполнительными регуляторами энергоблоков.

В аварийных режимах автоматика всех секций и несинхронных связей между ними переходит на локальный принцип работы, причем *отклонения частоты становятся главным источником информации* о требуемых направлениях и скоростях действия локальных регуляторов для обеспечения живучести ЭЭС в целом. Аварийные регуляторы ВПТ могут реагировать на разность частот переменного тока и в зависимости от знака, величины и скорости изменения этой разности дозированно увеличивать или уменьшать переток мощности. Если обстановка требует увеличения перетока пропускной способности ВПТ, то срабатывает ограничитель, который переведет вставку в режим стабилизации предельного перетока<sup>1</sup>. Аналогично могут работать аварийные регуляторы ППТ с той разницей, что для непрерывного контроля разности частот требуется канал связи между концевыми подстанциями.

Балансирующая автоматика секций ЭЭС должна работать по принципу автоматического «переподхвата» (АПП) потребителей, расположенных в граничных зонах. Источником информации для устройств АПП является опять-таки разность частот.

Принципиальные отличия предлагаемой автоматики секционированной ЭЭС от существующих решений сводятся к следующему:

- а) в нормальных режимах обеспечивается эффективная оптимизация в масштабе всей страны;
- б) в аварийных режимах локальное функционирование регуляторов перетоков и устройств АПП повышает быстродействие, ликвидирует алгоритмическую неопределенность предварительной настройки и снижает вероятность отказов;
- в) вместо полного погашения потребителей балансирующая автоматика ограничивается их кратковременным отключением для перевода на несинхронную секцию;
- г) для реализации такой системы требуются минимальные капитальные и эксплуатационные затраты.

Рассматриваемая автоматика должна стать одним из опорных элементов АСОДУ нового поколения [10].

Сказанное можно рассматривать как разъяснение позиции сторонников секционирования ЭЭС. Одновременно необходимо решительно предостеречь против чрезмерного применения секционирования: разумное количество секций ЭЭС СССР является очень небольшим, и каждая ВПТ или ППТ должна иметь надежащее технико-экономическое обоснование.

Теперь мы имеем возможность сформулировать заключительный подвопрос — так что же следует делать дальше? Попытаемся ответить следующим образом.

Необходимо разработать математические модели трех вариантов дальнейшего развития ЭЭС СССР: по пути создания по всей стране равнопрочных связей на переменном токе, по пути перекрытия всей страны мгновенно действующей адаптивной балансирующей автоматикой и, наконец, по пути деления ЭЭС СССР на значительном (скажем, до 15—25) число несин-

хронных секций, связанных через ВПТ или ППТ с оперативно перемещаемыми границами. С учетом планов развития народного хозяйства СССР рассчитать технико-экономические характеристики эффективности и надежности каждого варианта и провести их сравнение.

Можно предположить, что ни один из названных вариантов не окажется благоприятным. Но проведенная работа позволит определить теоретически оптимальные условия применения каждого решения. Если после этого применить тот же метод анализа к отдельным регионам ЭЭС СССР и к электрическим связям между ними, то из-за неодинаковых географических и экономических условий в одном случае окажется наиболее правильным создать практически равнопрочную системообразующую сеть 500 или 750 кВ, в другом — охватить все центры генерации и потребления кибернетическим балансированием режима, а в ряде мест (возможно, их окажется 3, 5 или 8) экономическое преимущество будут иметь ВПТ и ППТ. Весьма важно правильно выбрать точки размещения и очередность строительства несинхронных связей. Для ускорения окупаемости капиталовложений необходимо иметь в виду возможность строительства ВПТ с перспективной последующей реконструкции каждой из них в одну из концевых подстанций ППТ.

Вероятно, первой в СССР публикацией о преимуществах ВПТ и ППТ в составе ЭЭС была книга чл.-корр. АН СССР Д. Г. Жимерина [11], где на стр. 99 сказано следующее: «Проблема поддержания устойчивости энергетических систем усложняется по мере увеличения их мощности и, по-видимому, достигнет критического уровня... Все указанные проблемы решаются методом расщепления энергосистем путем вставок между ними линий электропередач постоянного тока». Со времени подготовки книги [11] прошло десять лет и, по нашему мнению, необходимо приступить к практической реализации выдвигаемых предложений.

**Выводы.** 1. На современном и прогнозируемом этапе развития ЭЭС СССР могут быть сохранены все принципы ее построения, заложенные в плане ГОЭЛРО, кроме требования синхронной работы в масштабе всей страны.

2. Использование несинхронных связей ни в коей мере не отрицает преимуществ Единой энергосистемы СССР. Наоборот, такие связи повышают эффективность совместной работы энергообъединений. Это также ни в коей мере не означает отказа от единого оперативного и автоматического управления ЭЭС СССР. Речь идет только о совершенствовании используемых теоретических концепций и практических решений.

3. Правильное решение проблемы должно быть получено на основе научного анализа эффективности вариантов развития каждого конкретного региона ЭЭС СССР и электрических связей между ними по экономическим критериям. При построении этих критериев важнейшую роль должны играть требования локализации системных аварий и их автоматического преодоления без длительных отключений потребителей электроэнергетики.

4. Кроме математических ожиданий возможных ущербов в основе технико-экономических обоснований целесообразности строительства ВПТ или ППТ могут быть использованы оценки дополнительных эффектов от упрощения управления перетоками активной мощности и снижения суммарного ущерба при понижении или повышении частоты в одной из секций ЭЭС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веников В. А., Рыжов Ю. П. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока. Учебн. пособие для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Тезисы докладов на координационном совещании по применению АС ЭМПЧ в энергосистемах / Новочеркасский политех. ин-т. — Новочеркасск, 1980.
3. Сборник директивных материалов по эксплуатации энергосистем (электротехническая часть) / Минэнерго СССР. — М.: Энергоиздат, 1981.
4. Ершевич В. В., Шлимович В. Д. Об использовании электропередач постоянного тока для формирования основной сети ЭЭС СССР. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1986, № 4.
5. Выборгская преобразовательная подстанция как элемент связи энергосистем СССР и Финляндии / Н. С. Лазарев, В. В. Левченко, Н. К. Ракова и др. — Электричество, 1986, № 2.
6. Ершевич В. В., Мамикоянц Л. Г. Научно-технический прогресс в электроэнергетике. — Электричество, 1986, № 2.
7. Knudsen J., Skodheim O., Albrecht P. F. A survey of the reliability of HVDC systems throughout the world during 1981—1982. — CIGRE, 1984 Session, paper 14—06.

<sup>1</sup> Действие существующих ограничителей на отключение ЛЭП является еще одним крупным недостатком современной противоаварийной автоматики ЭЭС.

8. Мелентьев Л. А. Современные задачи энергетической науки в свете решений XXVII съезда КПСС. — Изв. вузов. Энергетика, 1986, № 7.

9. Щербина Ю. В., Салимон П. И., Скляр В. Ф. Управляемость энергообъединений в современных условиях. — Энергетика и электрификация, 1985, № 4.

10. Автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления электроэнергетическими системами / О. Н. Войтов, В. Н. Воронин, А. З. Гамм и др.; Под ред. М. Н. Розанова, В. А. Семенова. — Новосибирск: Наука, 1986.

11. Жимерин Д. Г. Энергетика: настоящее и будущее. — М.: Знание, 1978.

#### АРЗАМАСЦЕВ Д. А.

Дополнительно к положениям, рассмотренным В. А. Вениковым, имеет смысл обсудить соображения по вопросу о разделении ЭЭС вставками постоянного тока (ВПТ). Это предложение появилось в печати довольно давно [11] и обосновывалось примерно следующим:

а) по мере роста ЭЭС она может достичь критического уровня, т. е. в смысле устойчивости окажется неуправляемой;

б) из-за увеличения токов к. з. возрастет сложность проблемы ликвидации аварий.

В последние годы вновь появились высказывания в пользу деления ЭЭС на части с помощью управляемых ВПТ [2]. Обоснования этих предложений в основном сводятся к следующему.

1. Стратегия на разделение ЭЭС с помощью ВПТ на самостоятельные части определяется тем, что она уже достигла пределов территориальной протяженности и установленной мощности, в результате чего становится и уже частично стала неуправляемой, особенно в аварийных ситуациях.

2. Слишком сложная системная автоматика уже в принципе не может удовлетворительно работать и к тому же алгоритмически неопределенна. Она вызывает большие и все увеличивающиеся ущербы от неуправляемых снижений частоты и недостаточной пропускной способности межсистемных связей. Результатом этого является потеря устойчивости и живучести ЭЭС.

3. Согласно объективным законам электромеханики синхронная работа неравномоощных энергообъединений ставит последние в экономически неравноправные условия, и поэтому невозможно поддерживать экономически оптимальный режим ЭЭС в целом.

4. Ущерб от аварий и снижения частоты из-за дефицита мощности должна нести не вся ЭЭС, а лишь та ее часть, где имеется дефицит мощности, и это будет справедливо с позиций народного хозяйства.

5. В конечном счете установка ВПТ обеспечит: равноправную управляемость перетоками, локализацию отклонений частоты, упрощение структуры и повышение качества работы противоаварийной автоматики, локализацию развития каскадных аварий, повышение надежности ЭЭС в целом, уменьшение капиталовложений в развитие ЭЭС за счет уменьшения токов к. з., уменьшение нерегулярных колебаний перетоков, увеличение пределов загрузки параллельно работающих связей.

6. Существующая концепция параллельной работы энергообъединений должна быть дополнена секционированием ЭЭС с помощью ВПТ при надлежащем техническом и экономическом обосновании.

Если кратко просуммировать представленные выше доводы, то основное их содержание сводится к тому, что современная ЭЭС уже не удовлетворяет главным критериям: экономичности, качества электроэнергии, режимной управляемости, устойчивости, живучести. Именно поэтому ее следует разрезать на части с помощью ВПТ и перейти к раздельным режимам с жестко заданными перетоками по ВПТ между энергообъединениями.

Попытаемся рассмотреть состояние и перспективы ЭЭС с точки зрения удовлетворения указанных критериев, сосредоточив внимание лишь на принципиальных положениях, определяющих решение проблемы в целом. Это позволяет не рассматривать отдельно каждое из перечисленных выше положений.

ЭЭС является уникальной по исполнению, но тем не менее обладающей всеми типичными свойствами больших технико-экономических систем [3]. Не перечисляя эти свойства, отметим следующие моменты.

1. Из элементарных положений теории экономической оптимизации хорошо известно, что экономически оптимальный режим любой большой технико-экономической системы (БЭС) принципиально всегда выгоднее совокупности локальных, экономически оптимальных раздельных режимов всех частей БЭС. Поэтому, если сохраняется возможность поддержания экономически оптимальных режимов ЭЭС в целом, то установка ВПТ оказывается экономически неоправданной. Именно поэтому некоторые авторы предложений, указанных выше в п. 6, оказываются в затруднительном положении, пытаясь совместить, вообще говоря, несовместимые вещи: сохранить концепцию па-

раллельной работы по глобальному критерию экономичности ЭЭС в целом, но секционировать ЭЭС с помощью ВПТ и перейти к локальным критериям экономичности отдельных энергообъединений.

Можно, конечно, попытаться сохранить экономичный режим ЭЭС в целом и даже улучшить его при соответствующем регулировании перетоков с помощью ВПТ. Однако это технически реализуемое мероприятие оказывается экономически неудачным из-за большой стоимости ВПТ по сравнению с другими устройствами, например, трансформаторами поперечного регулирования. Таким образом, применительно к нормальным режимам разделение ЭЭС с помощью ВПТ на отдельные части является плохим решением, и его не может улучшить декларация о сохранении «концепции параллельной работы энергообъединений».

2. Провозглашение принципа выделения с помощью ВПТ на раздельную работу дефицитных систем в целях борьбы с пониженной частотой фактически является вредным мероприятием. Здесь явно сказывается местнический характер, выгодный только для избыточных систем при значительно большем ущербе в дефицитных системах. Во-первых, этот принцип приведет к неоправданному увеличению резервов мощности (в том числе и аварийных) в отдельных системах. Во-вторых, нельзя считать, что при дефиците мощности бороться со снижением частоты в целом для ЭЭС хуже, чем взвалить все тяготы на плечи отдельных дефицитных систем, поставить их в особо тяжелые условия при сохранении нормальной работы в избыточных системах. Достаточно хорошо известен, технически и экономически вполне реализуем комплекс мероприятий, обеспечивающий нормативные значения частоты в любых, нормальных и аварийных режимах ЭЭС при использовании резервов мощности (в том числе и аварийных) и частотной разгрузки как общесистемных мероприятий, а не только в дефицитных районах.

3. Большие технико-экономические системы управляемы, если система управления по своим функциональным возможностям соответствует сложности управляемой системы (это следует из известного принципа Эшби). В настоящее время не видно оснований для утверждения о невозможности создания такой системы управления. Современные АСУ и АСДУ, используемые на различных иерархических уровнях ЭЭС, при всех их пока еще имеющихся недостатках и незавершенности в основном обеспечивают (совместно с другими средствами) режимную управляемость. На этот счет имеются достаточно серьезные исследования, например [4, 5]. Что же касается перспективы, то нельзя забывать следующее. Во-первых, АСДУ развиваются быстрее, чем ЭЭС, и поэтому ЭЭС не грозит перспектива потери режимной управляемости. Во-вторых, уже выполненные научные исследования и сделанные первые практические шаги показывают, что наметилась и далее будет существенно развиваться тенденция взаимного проникновения средств и методов АСДУ и системной автоматики на основе использования не только традиционных методов, но и в значительной степени методов ситуационного управления с обязательным использованием ЭВМ и микропроцессоров на всех уровнях системной иерархии. Реализация этого гарантирует и в дальнейшем режимную управляемость ЭЭС как единого целого.

4. Опыт эксплуатации ЭЭС показывает, что она в основном удовлетворяет критериям устойчивости и живучести. В противном случае даже небольшие возмущения приводили бы к потере устойчивости или даже живучести. Анализ наблюдавшихся различных аварийных возмущений показывает, что ЭЭС ни разу не потеряла живучести, а нарушения устойчивости были локализованы и не приводили к развалу ЭЭС или ее частей. Вместе с этим нельзя игнорировать тот факт, что из-за недостаточного сетевого строительства в ЭЭС имеются слабые связи, которые потенциально являются источниками понижения надежности ЭЭС.

Таким образом, утверждение, что ЭЭС находится на пределе режимной управляемости и достигла критического уровня устойчивости, не имеет под собой достаточно глубоких научных или практических обоснований. Отсутствуют основания также и для высказанных в [2] пессимистических предположений о том,

что системная автоматика алгоритмически неопределенна, снижения частоты неуправляемы, какие-то объективные законы электромеханики определяют какую-то неравноправность экономических условий работы разных энергообъединений.

5. По мере увеличения мощности ЭЭС растут токи к. з., и это действительно очень важная проблема, нуждающаяся в капитальном решении. Здесь вряд ли дадут долговременный эффект только изменения схемы сети. Потребуется замена неподходящих выключателей или же усиление их по разрывным способностям (если это возможно). Определенный экономический эффект наряду с другими техническими средствами можно ожидать и от ВПТ, выбор мест установки которых нуждается в тщательном экономическом и техническом обосновании.

6. Особо должен стоять вопрос о сохранении живучести ЭЭС с учетом возможного появления сверхтяжелых аварий, вызванных внешними причинами и охватывающих значительную территорию. В этих условиях не следует недооценивать полезную роль ВПТ, но необходим тщательный анализ целесообразности и выбора как мест установки ВПТ, так и их различных режимов работы (например, включение только при появлении опасных ситуаций или же работа и в нормальных режимах), поскольку речь идет о сохранении живучести значительной части ЭЭС и нераспространении аварийных условий на другие регионы.

БАРКАН Я. Д., КРИШАН З. П., КУЗЬМИН Я. Ф., МАРКУШЕВИЧ Н. С.

В основу развития энергетических систем заложена объективная необходимость общества в обеспечении баланса между генерацией и потреблением электрической энергии и тепла с учетом целесообразного резервирования.

При решении этой проблемы может быть, в частности, выделен ряд аспектов: интегральный аспект (баланс энергии), временной аспект (баланс мощности), пространственный аспект (размещение источников энергии), влияние на естественное и искусственное окружение (экология и электромагнитная совместимость), социологический аспект (человеческий фактор) и, разумеется, экономический аспект.

Каждый из названных выше аспектов взаимосвязан с другими и требует решения комплекса сложных задач, например о целесообразном соотношении органического и ядерного топлива, о размещении источников энергии [1], о местах преобразования одного вида энергии в другой, о средствах транспорта энергии, об энергосберегающей технологии [2], об аккумуляровании энергии, о количестве и качестве живого труда, необходимого для производства и передачи энергии и т. п.

Как видно, речь идет об оптимизации исключительно сложной кибернетической системы, оказывающей существенное влияние на жизнь общества.

В практической работе приходится прибегать и к решениям, порожаемым складывающейся неблагоприятной обстановкой и имеющим временный, конъюнктурный характер. Однако важно отличать конъюнктуру, трудности которой необходимо преодолевать, от долговременных факторов, на которые нужно ориентироваться при нормальном развитии. Поэтому необходимо четко отличать конъюнктурные соображения от научно обоснованных решений.

Учитывая большие ресурсоемкость и инерционность энергетической отрасли, решения о стратегических изменениях в ее развитии не должны приниматься на основе интуиции или под влиянием временной ситуации.

Единая энергетическая система всегда рассматривалась как объединение подсистем с ограниченной пропускной способностью связей между ними. Практически этим обеспечивается самобалансирование подсистем по активной мощности. При этом подразумевается равномерное распределение источников электрической энергии по регионам с плотностью, примерно соответствующей плотности нагрузочных узлов. При современной концентрации генерирующих мощностей в топливно-энергетических комплексах и на АЭС генерирующим источником для удаленного региона следует считать и сверхмощные надсистемные ЛЭП, в том числе ППТ. Выбор оптимальной мощности источников энергии должен осуществляться на основе единства критериев экономичности, надежности и экологии.

Объединение подсистем связями ограниченной пропускной способности обеспечивает маневренный обмен мощности, который дает возможность: компенсировать погрешности прогноза, обусловленные вероятностной составляющей потребления; маневрировать резервами; полноценнее использовать сезонные особенности балансов мощности; реализовать широтные сме-

7. Установка ВПТ как одного из качественно новых элементов режимной автоматики должна обосновываться не с позиций выбора каждой ВПТ отдельно, а с учетом системного эффекта от нескольких ВПТ. Не исключено, что при совместной работе нескольких ВПТ возникнут качественно новые явления, которые не упростят, а возможно, приведут к повышению сложности некоторых аспектов системной автоматики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жимерин Д. Г. Энергетика: настоящее и будущее. — М.: Знание, 1978.
2. Щербина Ю. В., Салимон П. И., Скляров В. Ф. Управление энергообъединений в современных условиях. — Энергетика и электрификация, 1985, № 4.
3. Мелентьев Л. А. Системные исследования в энергетике. — М.: Наука, 1983.
4. Автоматизация управления энергообъединениями / Под ред. С. А. Совалова. — М.: Энергия, 1979.
5. Управление мощными энергообъединениями / Под ред. С. А. Совалова. — М.: Энергоатомиздат, 1984.

щения неравномерностей нагрузок и т. п. Естественно, что объединением подсистем на такой большой территории как наша страна создается крупнейшая единая энергосистема. Поэтому могут возникнуть опасения в части ее управляемости.

Такое положение может возникнуть, если предположить, что требуется высокоцентрализованное управление. Однако это предположение является несостоятельным. Управление большим комплексом сводится не к решению задач нереальных размерностей, а к такому их разделению на части, чтобы путем их решения в отдельности обеспечивалось наилучшее решение единого целого. Структура оперативного и автоматического управления организуется в подсистемах, которые для всех задач имеют реальную размерность. С более высоких иерархических уровней достаточна координация, преследующая цель оптимизации целого [3, 4].

Одной из задач, подлежащих решению в рамках ЭЭС, является поддержание постоянства частоты. Необходимо иметь в виду, что промышленные потребители электрической энергии не представляют пассивную среду. Преднамеренное манипулирование параметрами электрической энергии (частотой и напряжением) в диапазоне, чувствительном для электропотребления, приводит к эффекту приспособления (увеличению мощности рабочих механизмов, применению местных средств регулирования и др.). В период поддержания нормальных параметров это приводит к необоснованному росту потребления и, в конечном итоге, к излишнему электропотреблению, а следовательно, к народнохозяйственному ущербу, достигающему огромных значений.

В этом отношении нельзя адаптироваться к аномалиям, полагая их и в будущем чем-то нормальным. Баланс мощности, оперативно поддерживаемый в подсистемах, одновременно решает и эту задачу, которая не зависит от размеров объединения. Если же для ближайшей перспективы постоянство частоты считать само по себе разумным положением, то ВПТ между подсистемами могут оказаться экономически и технически обоснованными элементами.

Самобалансирующиеся подсистемы обеспечивают отсутствие регулярных потоков активной мощности между подсистемами. Однако, разумеется, подобные потоки временами возникают, компенсируя разрывы между сроками роста нагрузок и вводом генерирующих мощностей в соответствующих регионах (обоих знаков). Подобные потоки, а также отказы линий больших пропускных способностей и генерирующих источников, связаны с необходимостью принятия оперативных мер автоматического противоаварийного управления. Эти средства являются естественными, и опыт их применения свидетельствует, что с их помощью эффективно предотвращаются лавинные (цепочечные) аварийные процессы. Использование ВПТ в этом смысле практически ничего не меняет, так как отказы элементов и в этом случае должны сопровождаться противоаварийным управлением, характер которого имеет свои особенности, но отнюдь не в сторону существенного упрощения. Естественно, что в случаях грубых нарушений принципов рационального наращивания

энергетических мощностей в отдельных регионах потоки мощности могут оказаться настолько большими, что системы противоаварийного управления становятся громоздкими. Однако рациональное развитие в перспективе должно стать объектом пристального внимания и тщательно соблюдаться.

При синхронной работе энергосистем удовлетворяется баланс активных мощностей при любом участии «собственных» генерирующих источников за счет регулирования общего параметра — частоты в объединении. Практически нет средств «не дать» кому-нибудь необходимую мощность, если не привлекать системы вторичного управления генерацией. В этой связи могут возникнуть предложения делить ЭЭС на отдельно работающие части по следующим причинам [5]:

а) с целью ограничения действия противоаварийной автоматики управления рамками ограниченных районов;

б) ввиду стремления отдельных энергосистем улучшить показатели своей работы за счет других систем, а также упростить поддержание в работоспособном состоянии генерирующих мощностей, чему способствует неэффективность экономических стимулирующих средств;

в) вследствие недоверия к разумному взаимодействию; деление в этом случае приводит к отключениям потребителей в энергосистеме, где образовался дефицит мощности.

Каждое из этих соображений заслуживает тщательного анализа.

1. Размыкание единой энергосистемы возможно только в сечениях электрической системы с минимальными маневренными перетоками. Размыкание в сечениях, через которые протекают значительные потоки мощности, недопустимо. Однако наиболее сложные системы противоаварийного управления связаны именно с этими большими потоками. Сложность противоаварийного управления в рамках подобной системы сохраняется в полной мере и при наличии «секционирования».

Взамен усложнения противоаварийного управления можно предложить разделение единой энергосистемы на отдельно работающие части с оперативным перемещением мест разрывов, «переподхват» генерирующих мощностей и узлов нагрузок, с одной стороны, и наравне с обычной противоаварийной автоматикой более широкое применение устройств аварийного разделения, размещаемых в местах предполагаемых разрывов и оперативно вводиться в работу, с другой. Во втором случае исключается неполнота использования располагаемой мощности в нормальном режиме и возможностей резервирования, порождаемая раздельной работой.

Естественно, что решения, принимаемые по поводу схем и режимов работы, учитывают соображения, связанные с минимизацией издержек, вероятностью возникновения аварийных режимов и ущербов, связанных с ними. Профессиональный подход позволяет принимать достаточно точные решения даже на основе интуитивных оценок главных факторов.

Однако в этом случае анализ возникших событий требует столь же многосторонних оценок. В случаях, когда расследование событий содержит лишь фиксацию их числа и размеров, неизбежно возникают тенденции к упрощению задач, снижению их размерности, что связано с недостатками, не фиксируемыми в отчетных документах.

Централизованная автоматическая координация противоаварийного управления на базе управляющих ЭВМ только создается, что свидетельствует о разрыве в развитии самого производства и средств управления им. Казалось бы, это должно послужить основанием для ликвидации разрыва, а не снижения размерности задач, органически присущих достигнутому уровню производства.

2. Благодаря существующему в энергетике управлению, функционирующему в темпе реального времени, а также оперативной дисциплине фактор согласования работы с помощью экономических стимулов действует менее сильно, чем в других отраслях народного хозяйства. Однако роль экономических стимулов и здесь существенна.

Известно, что управление, частью которого является его экономическая составляющая, должно обладать сложностью, соответствующей сложности управляемого объекта. Для того чтобы экономические рычаги могли достигнуть полного успеха, они должны быть столь же подвижными, как и технологическое управление, и превратиться в его составляющую. Стремление к упрощениям в этом деле проявляется как несоответствие производственных отношений уровню развития производственных сил. Мировая практика имеет опыт оперативного установления экономических отношений между энергосистемами, обеспечи-

вающих желательное взаимодействие. Применение его модификаций, перспективных в наших условиях, в будущем не протиполоказано.

3. Попытка упорядочить взаимодействие путем предоставления «виновного» самому себе кажется крайней мерой, когда все средства уже исчерпаны и принято решение пойти на получение сиюминутного эффекта в балансе мощности путем перевода «виновных» регионов на работу с «переменной частотой», что вовсе не всегда оптимально для народного хозяйства. Подобное положение не может рассматриваться как техническое состояние системы, требующее научных разработок и обоснований. Это — аварийное состояние, которое не должно и не может продолжаться долго. Из этого состояния нужно выходить в возможно более короткое время.

Трудности в управлении энергетической технологией действительно имеются. Они объясняются, помимо прочего, человеческим фактором, которому уделяется внимание в партийных решениях. Совершенствование методов и средств управления энергетикой требует проявления интереса и инициативы к ним на местах — в энергосистемах. Опыт показывает, что там, где этой сфере уделяется должное внимание, появляются хорошие, инициативные специалисты, и необходимая инфраструктура создается своевременно (до того, как необходимость в ней становится очевидной для всех).

Некоторые трудности, возникшие в части управляемости энергетической технологией, носят характер, который может быть только временным. Эти трудности должны преодолеваются в кратчайшее время. Предложения о разъединении — это предложение конъюнктурного характера.

Что же касается науки об управлении развитием энергетикой, то она должна быть направлена на перспективу и конъюнктурной быть не должна. Исследования показывают, что для объективного выбора стратегии развития ЭЭС следует проводить сопоставление очень большого количества вариантов на достаточно продолжительный расчетный период [6, 7]. Естественно, такой метод выбора стратегий может быть реализован только с помощью развитых современных математических методов [6]. Однако в настоящее время внедрение новых методов анализа технико-экономических аспектов выбора стратегий развития ЭЭС базируется только на энтузиазме отдельных проектировщиков. Не всегда задачи ставятся так, чтобы в полной мере использовались возможности математических моделей процесса развития энергосистем. Назрела пора более широкого использования динамических методов анализа их развития. Разумеется, математические модели сами по себе не могут обеспечить реализацию системного подхода при перспективном проектировании систем. Опыт показывает, что это требует творческого подхода при постановке задач и тщательной подготовки исходной информации. Ощущается необходимость в переориентации инженеров-проектировщиков на новый системный стиль мышления.

По нашему мнению постановка вопросов о перспективах развития энергетики в стране актуальна, а для решения их необходимо развернуть широкие системные исследования всего комплекса. Начинать надо с создания моделей каждого аспекта, их составляющих, включая энерготехнологические модели отраслей народного хозяйства, экономические, экологические, социологические модели, модели технических систем для производства и передачи энергии и в дальнейшей модели взаимодействия разных составляющих, на основании которых можно говорить об оптимизации всего комплекса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капица П. Л. Эксперимент. Теория. Практика. — М.: Наука, 1977.
2. Эффективное использование электроэнергии / Под ред. К. Смита. — М.: Энергоиздат, 1981.
3. Веников В. А., Суханов О. А. Кибернетические модели энергетических систем. — М.: Энергоиздат, 1982.
4. Арзамасцев Д. А., Бартоломей П. И. АСУ и оптимизация режимов энергосистем. — М.: Высшая школа, 1983.
5. Щербина Ю. В., Салимон П. И., Скляров В. Ф. Управляемость энергообъединений в современных условиях. — Энергетика и электрификация, 1985, № 4.
6. Веников В. А., Шнель Р. В., Оруджев Ф. Д. Автоматизация проектирования в энергетике. — М.: Изд. МЭИ, 1985.
7. Дале В. А., Кришан З. П., Пагале О. Г. Динамические методы анализа развития сетей энергосистем. — Рига: Зинатне, 1979.



# О совершенствовании нормирования качества электроэнергии

(статьи Железко Ю. С.; Мамошина Р. Р. и Никифоровой В. Н., «Электричество», 1987, № 4)

ЖЕЖЕЛЕНКО И. В., доктор техн. наук, ЛИПСКИЙ А. М., канд. техн. наук

Совершенствование существующего или создание нового стандарта на качество электроэнергии (КЭ) подводит итоги определенного этапа практической и теоретической работы в области электромагнитной совместимости (ЭМС) различных видов электрооборудования, а также электрооборудования и электрических сетей; анализ этих итогов дает основания для суждения о соответствии действующего стандарта на КЭ требованиям современного уровня и перспектив развития электроэнергетики и, тем самым, о необходимости его корректировки или замены новым.

Утверждение ГОСТ 13109—67 было первым важным итогом, отразившим состояние и развитие проблемы ЭМС на период его создания. Опыт его использования в течение десятилетия, с одной стороны, подтвердил правильность основных положений стандартизации в области КЭ и принципов установления и нормирования показателей качества электроэнергии (ПКЭ) по напряжению, принятых в этом стандарте; с другой стороны, выявились как неполнота положений, касающихся вопросов контроля КЭ, так и несовершенство нормирования колебаний амплитуды напряжения [1]. Это привело к необходимости корректировки стандарта; в 1979 г. был принят ГОСТ 13109—67 \* с изменениями №№ 1 и 2 [1, 2]. Однако при корректировке не были учтены требования системного подхода к решению проблемы улучшения КЭ.

1. *Системный подход к нормированию КЭ.* Его смысл в рассматриваемом случае заключается в необходимости решения проблемы во взаимной связи и с учетом зависимости параметров ЭМС электрооборудования различных видов и электрических сетей на трех уровнях: первый обуславливается влиянием систем электроснабжения потребителей (СЭСП) как друг на друга через энергосистему, так и на энергосистему; второй уровень определяется взаимным влиянием электроприемников внутри одной СЭСП и, наконец, третий уровень характеризуется взаимным влиянием электрооборудования одного и того же технологического агрегата

Учет принципов системного подхода обуславливает необходимость нормирования ПКЭ не только на зажимах электроприемников, но и на более высоких иерархических уровнях электрической системы таким образом, чтобы сочетание значений ПКЭ на разных уровнях напряжений было взаимозависимым. Системный подход к стандартизации в области КЭ подразумевает наличие (и разработку в случае необходимости) многоуровневой научно-технической документации, что справедливо отмечено в [3]: ГОСТов, ОСТов, являющихся межотраслевыми стандартами; отраслевых стандартов, учитывающих специфику отрасли; технических условий (ТУ) и стандартов на различные виды электрооборудования; различного рода методических и инструктивных материалов для проектных организаций и энергетических служб предприятий. Очевидно, что все нормативные материалы не должны противоречить общепромышленному стандарту на КЭ, каким является ГОСТ 13109—67 \*; более того, их требования должны соответствовать требованиям общепромышленного стандарта. Отсюда следует, что в ГОСТе не должно быть излишней детализации требований, — они должны быть достаточно общими. ГОСТ 13109—67 \* этому требованию удовлетворяет.

2. *Необходимость введения новых ПКЭ.* Прогресс в области электроэнергетики и систем управления и накопленный за последние 10—15 лет опыт эксплуатации энергосистем и СЭС свидетельствует о том, что существующий стандарт не в полной мере регламентирует вопросы КЭ; принятый перечень ПКЭ недостаточен. Рассмотрим этот вопрос подробнее:

а) интенсивное внедрение для автоматизации технологических и энергетических процессов, микропроцессорной техники и компьютеров, весьма чувствительных к «провалам» и «выбросам», напряжения, т. е. к импульсным процессам в СЭС, обуславливают необходимость ограничения этих процессов. Проведенные исследования [4] показали, что неучет данных обстоятельств чреват тяжелыми последствиями для предприятий, в частности, с непрерывным поточным производством. Экономические ущербы достигают нескольких миллионов рублей в год [5]. Микроэлектронные системы становятся массовым рецептором, реагирующим на импульсы напряжения, что обуславливает целесообразность нормирования допустимых значений их параметров посредством соответствующего ПКЭ;

б) практика эксплуатации свидетельствует о том, что при работе электродуговых сталеплавильных печей, которые ста-

новятся одним из основных видов сталеплавильных агрегатов, и прокатных станов возникают колебания фазы напряжения, обусловленные набросами активной мощности. При этом в ряде случаев возникают вибрации трубопроводов, сопровождающиеся гидравлическими ударами, и другие негативные явления. Проведенные исследования [6, 7] подтверждают локальный характер этих явлений, благодаря чему нормирование колебаний фазы на основе допустимых размахов колебаний частоты в энергосистеме оказывается лишенным смысла. В силу достаточной пространственности этого явления и потенциальной его опасности для некоторых видов электрооборудования и технологических процессов представляется целесообразным нормировать колебания фазы с введением соответствующего ПКЭ;

в) для оценки колебаний напряжения наряду с кривой допустимых значений целесообразно ввести такой ПКЭ, как доза фликера [8].

3. *Основные положения разработки нового стандарта на КЭ.* Ранее неоднократно отмечалось (например, [1]), что в значительной мере ГОСТ 13109—67 \* отвечает требованиям практики, а нормы его могут считаться экономически обоснованными. Дальнейшее совершенствование стандарта требует, в первую очередь, установления дополнительных пунктов контроля, в которых должны быть нормированы значения НКЭ, а также введения новых ПКЭ, и эти обстоятельства в формальном отношении позволяют говорить не о совершенствовании прежнего, а о разработке на его основе нового стандарта.

Кратко подытожим обосновывавшиеся нами ранее [1, 6 и др.] положения предполагаемого стандарта на КЭ:

а) допустимые значения ПКЭ должны быть указаны не только на зажимах электроприемников, но и на границе раздела балансовой принадлежности электрических сетей энергоснабжающей организации и потребителя; в последнем случае эти значения должны быть меньше, чем на зажимах электроприемника. Это положение, неоднократно высказывавшееся авторами ранее, в полной мере соответствует изложенному в [3, 9]. Соответственно и наименование стандарта должно быть изменено: «Нормы качества электрической энергии у ее приемников, присоединенных к электрическим сетям общего назначения, и на границах раздела балансовой принадлежности электрических сетей энергоснабжающих организаций и потребителей».

Допустимые значения ПКЭ на границах раздела определяются значительной совокупностью факторов, зачастую противоречивых [10, 11 и др.], и, на наш взгляд, должны устанавливаться на основании экспертных оценок. Разграничение ПКЭ по классам напряжения в первом приближении выполнено нами на основании значений средних мощностей коротких замыканий на разных ступенях напряжений. При этом наибольшие допустимые значения ПКЭ, соответствующие данным ГОСТ 13109—67 \*, должны быть приняты в сетях 0,4—10 кВ.

На основании проведенных расчетов авторы полагают, что значение коэффициента обратной последовательности (коэффициента несимметрии напряжений) должно допускаться равным не более 2 % на зажимах любого трехфазного приемника электрической энергии и на границах раздела балансовой принадлежности в электрических сетях напряжением 6—10 кВ и менее 1000 В; напряжением 20—35 кВ — не более 1,2 %; 110—220 кВ — не более 0,7 %; при более высоких напряжениях — не более 0,5 %. То же для коэффициента несинусоидальности — соответственно 5 %; 5 %; 2 %; 1 %. На границе раздела балансовой принадлежности размах колебаний амплитуды, приведенной к частоте 10 (8,8) Гц, не должен превышать соответственно 0,4 %; 0,29 %; 0,13 %; 0,1 %. Значения дозы фликера целесообразно ограничить следующим образом: 0,2 (%)<sup>2</sup>; 0,14 (%)<sup>2</sup>; 0,06 (%)<sup>2</sup>; 0,05 (%)<sup>2</sup>;

в) во избежание прогрессирующего «засорения» высшими гармониками сетей энергосистем и последующего проникновения их в системы электроснабжения потребителей необходимо ограничивать «выброс» гармоник тока из сетей потребителя в сети энергоснабжающей организации. Строгая регламентация в этом случае чрезвычайно затруднена в силу большого разнообразия условий подключения и особенностей нелинейных нагрузок: их мощностей и мощностей короткого замыкания сети, амплитудных спектров токов, амплитудно-частотной характеристики входного сопротивления сети в узле подключения нелинейной нагрузки [12] и взаимных сопротивлений, нестабильности этих характеристик и многих других факторов [10, 11]. По существу, задача нормирования в общем случае является неопределенной

и окончательное решение может быть принято лишь на основе экспертных оценок. Нам представляется целесообразным подход, основанный на ограничении коэффициента несинусоидальности тока в линии на границе раздела балансовой принадлежности значением 4—5 % при минимальных (и больших) соотношениях мощностей нелинейных нагрузок и короткого замыкания в узле подключения (например, 30—40) [11]. Ограничение значений предельных гармоник, установленное в ряде зарубежных стандартов, представляется излишним в силу отмеченной выше нестабильности частотной характеристики и отсутствия объективных данных об этой характеристике.

Коэффициент несинусоидальности тока является, очевидно, новым ПКЭ.

в) Ранее была обоснована [6, 7] целесообразность введения в качестве нового ПКЭ размаха колебаний фазы напряжения. Допустимое значение этого ПКЭ, как показали проведенные исследования авторов, может быть принято равным 5 град. Обоснованной представляется также необходимость нормирования параметров коммутационных импульсов [4] в силу их негативного влияния на разного рода электронные и микроэлектронные системы, использование которых становится массовым. Отвлекаясь от особенностей реакции различных систем с релейными характеристиками на «посадки» и «выбросы» напряжения, отметим общее: реакция зависит от амплитуды импульса. Это позволяет рекомендовать на основании [5] для нового стандарта следующее положение: амплитуда импульса кратковременного изменения напряжения на границе раздела балансовой принадлежности допускается не более 10 %. Это требование, очевидно, должно относиться и к коммутационным импульсам, возникающим при работе вентиляльных преобразователей, если на их шинах имеются другие нагрузки. При отсутствии последних условия работы преобразователей регламентируются только ГОСТ 18142—80.

г) В стандарте целесообразно оговорить требования к классу точности измерительных приборов и постоянным времени (собственным частотам) их измерительных трактов [13], что будет способствовать исключению неоднозначности результатов измерения. Требования к длительности измерений желательно уточнить и расширить. Точка зрения по этому поводу, изложенная в [3], представляется предпочтительней. Предложенный И. А. Мельниковым принцип 95 %-ной вероятности результатов желательно сохранить. Разделение колебаний и отклонений напряжения, как было обосновано выше и ранее (например, [14]), целесообразно производить по частоте изменения огибающей, что просто реализуется средствами аппаратного контроля уровней ПКЭ. Здесь авторы отмечают, что в [9] разделяется их точка зрения.

д) Если происходит ухудшение качества электроэнергии одновременно по нескольким показателям, целесообразно их допустимые значения уменьшить, что отмечено в [5]; например, это может быть сделано с помощью коэффициента  $k_y < 1$ . Очевидно, для определения значений  $k_y$ , зависящих от состава оборудования и режимов его работы, особенностей системы электроснабжения и других обстоятельств, в конкретных случаях необходимо проведение специальных исследований. В качестве первоначальной рекомендации для обсуждения экспертами может быть предложено значение  $k_y = 0,8$  для всех ПКЭ.

Представляется целесообразным восстановить терминологию в области КЭ, поскольку принятая ГОСТ 23875—79 весьма громоздка, неудобна и во многих случаях не отвечает документам МЭК.

**Выводы.** 1. Структура и основные положения действующего ГОСТ 13109—67 \* отвечает основным требованиям, предъявляемым к общесоюзному межотраслевому стандарту на КЭ; их целесообразно сохранить при разработке нового стандарта.

2. Прогресс в области электроэнергетики и систем управления, создаваемых на микропроцессорной элементной базе, обуславливает необходимость разработки нового стандарта, основанного на системном подходе к проблеме ЭМС и учитывающего новые виды электромагнитных помех, к которым чувствительно электрооборудование и системы управления.

3. В новом стандарте целесообразно нормировать значения ПКЭ также на границах раздела балансовой принадлежности электрических сетей, ввести и нормировать допустимые значения новых ПКЭ: коэффициента несинусоидальности тока, размаха колебаний фазы напряжения и амплитуды импульса напряжения. Желательны также некоторые уточнения действующих нормативов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жежеленко И. В., Никифорова В. Н. Изменение стандарта на качество электроэнергии. — Электричество, 1983, № 1.
2. ГОСТ 13109—67 \*. Нормы качества электрической энергии у ее приемников, присоединенных к электрическим сетям общего назначения.
3. Железко Ю. С. О совершенствовании нормирования качества электроэнергии. — Электричество, 1987, № 4.
4. Жежеленко И. В., Шиманский О. Б. Электромагнитные помехи в системах электроснабжения промпредприятий. — Электричество, 1983, № 12.
5. Жежеленко И. В., Шиманский О. Б. Электромагнитные помехи в системах электроснабжения промышленных предприятий. — Киев: Вища школа, 1981.
6. Жежеленко И. В., Липский А. М. Колебания фазы напряжения в сетях с вентиляльными преобразователями электроприводов. — В кн.: Пробл. преобраз. техн.: Тез. докл. Всес. науч.-техн. конф. т. 3. Киев, 1979.
7. Жежеленко И. В., Липский А. М., Чубарь Л. А. Малые колебания синхронных электродвигателей в сетях промпредприятий с электродуговыми стапелавильными печами. — Изв. вузов. Энергоатомиздат, 1981, № 6.
8. Система показателей и нормирование качества электрической энергии / Б. А. Константинов, И. В. Жежеленко, В. Н. Никифорова и др. — Электричество, 1978, № 9.
9. Мамошин Р. Р., Никифорова В. Н. О совершенствовании нормирования качества электроэнергии. — Электричество, 1987, № 4.
10. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
11. Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
12. Частотные характеристики узлов нагрузки сетей промышленных предприятий / И. В. Жежеленко, А. М. Липский, Л. А. Чубарь и др. — Электричество, 1982, № 3.
13. Жежеленко И. В., Липский А. М., Поляков Г. И. Автоматизированный контроль и учет качества электроэнергии. — В кн.: Проектирование и эксплуатация систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: МДНТП, 1984.
14. Жежеленко И. В., Липский А. М., Коляда Л. И. Оценка отклонений напряжения при наличии колебаний его амплитуды. — Изв. вузов Энергетика, 1981, № 1.



#### МАРКУШЕВИЧ Н. С.

Разрабатываемый в настоящее время ГОСТ «Нормы качества электроэнергии» вступит в действие в середине текущей пятилетки. Наиболее активное его внедрение придется на конец этой и следующую пятилетку. Таким образом, при создании стандарта необходимо учитывать тенденции развития народного хозяйства и технического перевооружения, которые намечаются на этот период.

Уже в настоящее время действующий ГОСТ не дает ответов на ряд вопросов потребителей, устанавливающих современную технику в энергосистемах. Разрабатываемый стандарт должен учитывать как перспективы развития техники в самих энергосистемах, так и перспективы развития контрольно-измерительных приборов. Ориентация на существующие решения в этой

области, разумеется, неизбежна для повышения практически разрабатываемого документа, однако она не должна сдерживать прогресс в области развития техники. Представляется целесообразным включить в разрабатываемый ГОСТ принципиальные положения, ориентированные на обозримую перспективу, а конкретную реализацию этих положений на каждый период обеспечить методическими материалами Минэнерго СССР, разрабатываемыми на более короткие периоды. На наш взгляд, в ГОСТе должны быть указаны все известные в настоящее время характеристики отличия от номинальной частоты электрического тока, номинального напряжения, синусоидальной формы и симметрии напряжения в многофазных цепях.

Автор [1] считает основой характеристики качества электро-

энергии (КЭ) воздействие КЭ на электроприемник (ЭП), представленное в виде интеграла от степенной функции. Как известно, такое воздействие может быть равносильно представлено средним (за период интегрирования) отклонением от номинала. Далее автор [1] отказывается от применения средних величин в качестве показателей КЭ (ПКЭ) из-за методических и аппаратных трудностей.

На самом деле функция вида (1) из [1] не является общим случаем представления воздействия КЭ на работу ЭП. Многообразие здесь намного шире: полиномы, кусочно-монотонные зависимости, изменение постоянной времени при изменении величины параметра и др. Этот факт и является основной причиной отказа от ПКЭ в виде средних величин. Частично на это указано и в [2].

Следовательно, если характер воздействия на ЭП не может служить основой для выбора ПКЭ, надо найти другую методическую основу. В качестве таковой нам представляется целесообразным принять причины отклонений от идеального качества. Например, изменения состава и интенсивности работы электроприемников, вызванные технологическими, временными, световыми циклами, являются причиной сравнительно медленных изменений отклонений напряжения, а флуктуации резкопеременных нагрузок в силу самой природы соответствующих ЭП — причиной колебаний напряжения, и т. д.

Поэтому в основу предлагаемого нами разделения ПКЭ положен частотный принцип. При этом длительность периода процесса с заданной частотой вовсе не является периодом усреднения, как это принимается в [3]. Анализ и нормирование процессов, разделенных по частоте, может производиться любыми методами, необходимыми в каждом случае.

Исходя из вышесказанного нам представляется, что в качестве ПКЭ могут быть приняты следующие параметры;

отклонение частоты от номинальной, равное разности между фактическим значением частоты и номинальным;  
размах изменения фазы вектора напряжения, определяемый как разность длительности смежных полупериодов напряжения;  
отклонение напряжения, равное разности между составляющей изменения напряжения с частотой не более 0,01—0,001 Гц и его номинальным значением;

колебания напряжения — изменение действующего значения напряжения с частотой более 0,01—0,001 Гц и менее 20 Гц;  
субгармоники — изменение амплитудного значения напряжения с частотой 20—50 Гц;

размах изменений напряжения, вызванных включением или отключением электроустановок;

высшие гармоники — изменение мгновенного значения напряжения с частотой более 50 Гц и менее 2,5 тыс. Гц;

сигналы циркулярного управления в силовых ЛЭП несущей частотой от 100 до 500 Гц;

сигналы управления в силовых ЛЭП тональной частоты (от 1000 до 20000 Гц);

сигналы управления в силовых ЛЭП на радиочастотах (20—500 кГц);

провалы напряжения — изменение амплитуды напряжения на 10 % и более в течение времени от 10 мс до 20 с;

переходные изменения напряжения длительностью менее 10 мс;

несимметрия напряжения, характеризующаяся напряжением обратной (нулевой) последовательности.

Нормы на КЭ должны определяться из технико-экономических расчетов народнохозяйственного эффекта, учитывающих затрат на производство ЭП с заданными качествами и на построение электроснабжающей системы с заданными требованиями. Однако на практике такое технико-экономическое сопоставление не обеспечено методически и информационно и поэтому практика выбора норм на КЭ основана на реальных свойствах современных энергосистем с учетом достаточно полного использования заложенных в существующие энергосистемы возможностей, а также с ориентацией на зарубежные нормы КЭ. При этом в отдельные периоды времени или в отдельных частях единой энергосистемы может сложиться ситуация, вызванная рядом объективных причин, при которых не удается даже при самом хорошем уровне эксплуатации обеспечить нормы КЭ, принятые для энергосистемы в целом или для более длительных периодов. Поэтому представляется целесообразным в ГОСТе на качество электроэнергии предусмотреть возможность временных норм, оговоренных местом и временем их действия, на основании документов, согласованных в установленном порядке. Например, какие-то нормы могут быть приняты менее жесткими в случаях отсутствия необходимого резерва по реактивной мощности или регулируемых под нагрузкой трансформаторов на срок, установленный планом по устранению этих причин или на время

ремонтного режима при согласовании этого периода с основными потребителями. Нормы в этих случаях могут называться нормами вынужденного режима. Таким образом, появляются два уровня норм, невыполнение которых влечет за собой в основном экономический ущерб. Следовательно, эти уровни норм могут иметь интегральную вероятность выполнения на уровне 0,95.

За несоблюдение этих норм виновная сторона должна нести финансовую ответственность по шкале надбавок за некачественную электроэнергию.

Третий уровень норм должен определяться технически допустимыми показателями качества, несоблюдение которых может привести к нарушению работоспособности электроустановок. Выход за эти пределы должен повлечь за собой финансовые санкции к виновной стороне, применяемые при аварийном отключении потребителей. Не все названные выше ПКЭ должны нормироваться разрабатываемым в настоящее время ГОСТом. Те ПКЭ, которые обусловлены объективными свойствами современных энергосистем и не могут быть изменены с помощью средств управления, должны быть названы в ГОСТе. В информационных или методических материалах Минэнерго СССР должны быть даны их статистические характеристики, соответствующие данному периоду развития энергосистемы. Это относится к таким показателям как провалы напряжения и переходные процессы.

Те сигналы, которые в электросетях наблюдаются, однако, не передаются по электрической сети к приемникам электроэнергии, а могут воздействовать только индукционным путем на информационные каналы других ведомств, должны нормироваться нормативными документами этих ведомств. В принципе нормы стандартов других ведомств могут быть продублированы и в настоящем стандарте. Это, в частности, относится к сигналам управления по силовым ЛЭП.

Нормы на КЭ, зафиксированные в ГОСТе и основанные на объективных возможностях современных энергосистем, должны приниматься как объективные свойства энергоснабжающей среды для всех ЭП, и, следовательно, нормы пределов помехоустойчивости ЭП должны разрабатываться их изготовителями с учетом реальных норм ГОСТа на КЭ.

Нормы на уровни помех, внешних ЭП, должны также даваться их разработчиками и учитываться проектировщиками присоединений потребителей с учетом свойств ЭП и существующего на расчетный период фона электроснабжающей сети.

Уровень метрологического обеспечения разрабатываемого стандарта в настоящее время низок. Это объясняется недостаточной номенклатурой и количеством специализированных приборов контроля качества. Тем не менее на любом этапе внедрения нового ГОСТа на КЭ методические указания по его применению должны предусматривать возможность использования любых существующих приборов для того, чтобы тем или иным путем оценивать установленные ПКЭ.

Другими словами, в зависимости от наличия измерительных приборов методическая и инструментальная погрешности контроля КЭ будут отличаться, что соответствующим образом должно учитываться.

Перспективы метрологического обеспечения ГОСТа на КЭ нам видятся в постепенном переходе к микропроцессорной технике в зависимости от ее быстродействия и емкости памяти, а в пределе — в переходе к одному прибору, на вход которого подается измеряемое напряжение без предварительного преобразования, а все преобразования, выделение составляющих и разных показателей качества производятся программным путем с помощью микропроцессорной техники.

При предлагаемом подходе к метрологическому обеспечению, в котором переход от одного этапа обеспечения к другому будет отображаться в сопровождающих ГОСТ методических и инструктивных материалах, сам ГОСТ не будет преградой для усовершенствования конкретных способов и средств измерения качества электроэнергии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железко Ю. С. О совершенствовании нормирования качества электроэнергии. — Электричество, 1987, № 4.
2. Система показателей и нормирование качества электрической энергии / Б. А. Константинов, И. В. Жежеленко, В. Н. Никифорова и др. — Электричество, 1978, № 9.
3. Мамошия Р. Р., Никифорова В. Н. О совершенствовании нормирования качества электроэнергии. — Электричество, 1987, № 4.

ВАГИН Г. Я., доктор техн. наук, КРАХМАЛИН И. Г., канд. техн. наук

Затронутый в статьях Ю. С. Железко [1], Р. Р. Мамошина и В. Н. Никифоровой [2] вопрос о совершенствовании нормирования качества электрической энергии (КЭ) является весьма актуальным и своевременным. Опыт применения ГОСТ 13109—67 выявил наряду с его достоинствами и ряд недостатков, которые подробно указаны в обеих обсуждаемых статьях.

Анализ предлагаемых к нормированию показателей качества электроэнергии (ПКЭ). В [1] предлагается нормировать 8 ПКЭ: отклонений частоты и напряжения, колебаний частоты и напряжения, кратковременных понижений и повышений действующего напряжения, вырезов и пиков на синусоиде напряжения, несимметрии токов и напряжений, гармонических искажений синусоидальной формы кривых токов и напряжений. Шесть из этих показателей нормируются в действующем ГОСТ 13109—67\*, целесообразность их нормирования доказана многолетней практикой эксплуатации промышленных предприятий. Два показателя вводятся вновь.

Необходимость нормирования кратковременных повышений и понижений напряжения доказана в большом числе публикаций [3—6 и др.] Однако как в публикациях МЭК, так и в ряде публикаций отечественных авторов, в том числе в [2], под кратковременными понижениями и повышениями напряжения понимаются помехи, поступающие в системы электроснабжения предприятий из энергосистем вследствие коротких замыканий, перенапряжений и т. д. Эти провалы и выбросы имеют большую величину, но малую вероятность. Нормировать эти выбросы и провалы следует на границе раздела энергосистемы и промышленного предприятия. Для провалов напряжения нормировать следует только допустимую частоту или вероятность, так как они имеют большую глубину и могут вызывать массовые отключения электроприемников (ЭП). Для выбросов напряжения следует нормировать как допустимую частоту, так и амплитуду, которая должна быть связана с допустимой величиной перенапряжения. Нормирование длительности провалов и выбросов, обусловленных энергосистемой, как это предложено в [2], не имеет никакого физического смысла, так как эта величина имеет очень большой разброс, а вероятность события мала.

Кроме того, на промышленных предприятиях имеется большое количество ЭП с импульсным и резкопеременным режимом работы (электротехнологические установки, прокатные станы и т. д.), которые сами создают провалы напряжения глубиной до 20%, с частотой до 8 Гц и длительностью от 0,02 до 360 с. Исследования [3—7 и др.] показывают, что эти провалы оказывают влияние на многие ЭП и их системы управления, и неучет их в ГОСТ 13109—67 приводит к значительным ущербам. Рекомендации по их нормированию будут даны ниже.

Рассмотрим целесообразность нормирования вырезов и пиков на синусоиде напряжения. Вырезы и пики на синусоиде возникают при коммутации различных типов преобразователей; их амплитуда, форма и частота даже для одного типа преобразователей; их амплитуда, форма и частота даже для одного типа преобразователя изменяется в довольно широких пределах. Приборов для измерения параметров вырезов и пиков на синусоидах нет, поэтому на данном этапе корректировки ГОСТ 13109—67\* введение этого показателя вряд ли целесообразно, тем более, что данный показатель учитывается при нормировании гармонических искажений напряжения.

Нуждаются в уточнении и определении некоторых ПКЭ, которые приведены в действующей измененной редакции ГОСТ 13109—67\*.

1. *Отклонения частоты.* Определение, данное в ГОСТе, полностью характеризует этот показатель и не нуждается в изменении. Предлагаемое в [1] изменение этого определения с переходом от осреднения в течение 10 мин к указанию текущего значения приведет к неопределенности этого показателя, как это случилось с отклонениями напряжения. Многие работники проектных организаций и служб эксплуатации промышленных предприятий не знают, следует отнести то или иное изменение напряжения к разряду отклонений колебаний, так как скорость изменения им обычно не известна. Исследования, выполненные в [8], показывают, что ущербы при отклонениях частоты длительностью менее 10 мин в пределах  $\pm 1$  Гц минимальны для всех потребителей промышленных предприятий.

2. *Колебания частоты.* В [1] правильно указано, что данный показатель совершенно не воспринимается потребителями электроэнергии в том виде, как он дан в ГОСТе. Авторы поддерживают предложение о замене этого показателя на «колебание фазы напряжения». Нормирование этого показателя

должно производиться на границе раздела энергосистемы и промышленного предприятия.

3. *Отклонения напряжения.* Выражение для определения отклонений напряжения, принятое в ГОСТе, не отражает полностью воздействие отклонений напряжения на ЭП

$$V = U - U_{\text{ном}} \quad (1)$$

Это объясняется тем, что возникает неясность, какое значение напряжения принимать за действительное в (1): мгновенное, среднее или среднеквадратичное. Известно, что воздействие отклонений на сеть и ЭП не может проявиться мгновенно и зависит от типа ЭП.

Исследования [3—7] показали, что за действительное значение напряжения  $U$  в выражении (1) можно брать среднее значение напряжения за интервал времени  $\theta$ . Интервал  $\theta$  можно по аналогии с электрическими нагрузками принимать равным постоянной времени нагрева элементов электрической сети  $\theta = 10$  мин; для электротехнологических установок  $\theta$  следует принимать равным времени включения  $t_{\text{в}}$  этих электроприемников [4—7] за цикл работы. Предлагаемое в [2] разделение изменений напряжения по частоте не вносит ничего нового и не учитывает интегральный характер воздействия отклонений напряжения в зависимости от свойств электроприемников и их реакции на длительность отклонения.

4. *Колебания напряжения.* В действующем ГОСТе этот показатель нормируется только для освещения. В качестве нормативной характеристики рекомендуется кривая допустимых размахов изменения напряжения в функции их частоты. Недостатки этой характеристики подробно проанализированы в ряде работ, например, [3], поэтому в [1] правильно отмечается, что в настоящее время существует единое мнение о нормировании «дозы колебания» или «дозы фликера». Методы расчета и приборная реализация измерения этих доз подробно описаны в литературе. Пятилетний опыт эксплуатации «фликерметра», разработанного на кафедрах электроснабжения Горьковского и Донецкого политехнических институтов, на Горьковском автозаводе показал его большую надежность, он обладает хорошей точностью измерения и прост в обслуживании. Прибор отвечает международным стандартам и может изготавливаться для продажи на экспорт. К сожалению, затянувшаяся в нашей стране на десятилетия дискуссия о том, как измерять колебания напряжения, привела к тому, что в настоящее время мы имеем только единичные экземпляры этих приборов. Не запланирован выпуск этих приборов и в серии приборов качества, которые выпускаются в нашей стране с 1985 года.

Предложение [2] об использовании для нормирования колебаний и «дозы фликера» и кривых допустимых размахов является нерациональным, так как создается неопределенность как в нормировании этого показателя, так и в средствах его контроля и измерения. Приборы, конструируемые для регистрации кривой допустимых размахов, которая получена различными приближенными методами, в том числе и методом экспертных оценок, не отвечают требованиям научно-технического прогресса и не могут быть конкурентоспособными на мировом рынке.

5. *Несинусоидальность и несимметрия напряжений.* Нормирование этих показателей с помощью коэффициентов несинусоидальности и несимметрии вполне себя оправдало. Нормирование напряжения нулевой последовательности  $V_0$  для промышленных предприятий нецелесообразно, так как доля таких нагрузок и их мощности весьма малы. Авторы поддерживают мнения [1, 2] о целесообразности нормирования коэффициента несинусоидальности и уровня отдельных гармоник, но число этих гармоник должно быть четко оговорено и не превышать 3—4, так как иначе значительно возрастает трудоемкость расчетов и измерений без ощутимого эффекта.

Авторы поддерживают также мнение, высказанное в [1, 2] о целесообразности нормирования двух значений ПКЭ—нормального и допустимого рабочего. Это решение подтверждается опытом исследования качества электрической энергии и его влияния на потребители, проведенного под руководством авторов на большом количестве предприятий различных отраслей промышленности [4—7]. Эти же исследования ставят под сомнение целесообразность нахождения «нормальных» значений ПКЭ в нормируемых пределах с интегральной вероятностью 0,95. Исследования [4—7 и др.] показывают, что эту вероятность можно снизить до 0,9. В остальных 10% случаев ПКЭ может находиться в пределах «допустимых рабочих» величин. Это положение подтверждается экономическими характеристиками ЭП в функции ПКЭ, которые построены в [8]. Данное

предложение обосновывается также тем, что ПКЭ нормируются исходя из 100 %-ной загрузки ЭП, однако исследования, проведенные в СССР и за рубежом, показали, что загрузка большинства ЭП не превышает 55—70 %, т. е. пересмотрев интегральную вероятность, мы повышаем эффективность использования систем электроснабжения, не увеличивая ущербов.

**Нормирование провалов напряжения, создаваемых электроприемниками.** Влияние провалов напряжения на различные ЭП и их системы управления подробно описано в [3—7]. Провалы должны характеризоваться тремя параметрами: продолжительностью  $t_{п}$ , размахом  $\delta V_{п}$  и частотой  $f_{п}$ .

Частоту и продолжительность провалов напряжения можно определить по графику нагрузки и производительности ЭП

$$f_{п} = n/t_{п}, \text{ с.} \quad (2)$$

где  $n$  — число импульсов тока за средний цикл работы электроприемников  $t_{п}$ , с

$$t_{п}, \text{ с} = P/t, \quad (3)$$

где  $P$  — производительность электроприемника за время  $t$  (час, смена и т. д.).

Размах (глубина) провала  $\delta V_{п}$  определяются по выражению

$$\delta V_{п} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\text{ном}}} 100 \%. \quad (4)$$

Если провал имеет не прямоугольную форму, его можно привести к эквивалентному по площади прямоугольному. Определение параметров провалов при их случайном характере дано в [4, 6].

Провалы напряжения должны нормироваться только для электротехнологических установок с импульсным режимом работы, ЭВМ, систем релейной защиты и автоматики, АСУ, систем управления ЭП, в которых нет собственных источников питания.

Исследования [4—6] показали, что если длительность провала напряжения соизмерима с временем включения ЭП ( $t_{п} \geq \frac{2}{3} t_{в}$ ), то его действие аналогично воздействию при отклонениях напряжения и его глубина не должна выходить за нижнюю границу допустимых отклонений напряжения; при  $\frac{1}{3} t_{в} \leq t_{п} < \frac{2}{3} t_{в}$  допустимую глубину провалов можно увеличить

в 2 раза, а при  $t_{п} < \frac{1}{3} t_{в}$  — в 3 раза. Для ЭВМ, АСУ, систем управления и автоматики провал напряжения любой длительности не должен превышать 10 % от  $U_{\text{ном}}$ . Эти положения получены на основании исследований в реальных сетях и их можно рекомендовать для нормирования провалов напряжения.

**О необходимости введения в ГОСТ интегрального показателя качества электроэнергии.** Большое разнообразие показателей качества по напряжению приводит к необходимости изготовления и применения большого числа приборов для их регистрации и контроля, а поскольку ряд показателей качества действуют на ЭП одновременно и носят случайный характер, то возникают трудности в оценке их суммарного воздействия.

Для достоверной оценки суммарного воздействия ПКЭ на ЭП необходима разработка динамических моделей ЭП. Электроприемник совместно с системой управления можно рассматривать как динамическую модель. Виды динамических моделей определяются видами ЭП и их систем управления. Анализ систем управления ЭП [4—7] показывает, что их можно сгруппировать в четыре основные группы: разомкнутые системы жесткого управления; с автоматической компенсацией возмущений; с автоматическим регулированием (по отклонению регулируемой величины); комбинированные системы.

Для динамической модели ЭП можно записать следующее выражение для эквивалентного изменения напряжения за время ее работы при наличии любых изменений напряжения (колебаний, отклонений, провалов и выбросов, несимметрии и несинусоидальности), которое можно назвать «дозой изменения напряжения»:

$$\Psi_U = \frac{1}{t_{в}} \int_0^{t_{в}} L[U_0(t)] dt, \quad (5)$$

где  $U_0(t) = U(t) - U_{\text{ном}}$ ;  $t_{в}$  — время включения ЭП;  $U(t)$  — текущее действующее значение напряжения при различных его изменениях;  $L$  — оператор функционального преобразования, который учитывает реакцию ЭП совместно с системой управления на изменение напряжения безотносительно к причине изменения и вид которого определяется особенностями ЭП и его системы управления, а также наличием устройств стабилизации и обратных связей.

Проверка допустимости изменений напряжения должна производиться по условию

$$\Psi_U \leq \Psi_{U_{\text{доп}}}. \quad (6)$$

Исходя из выражения (5) можно создать прибор, аналогичный фликерметру, который один будет измерять суммарное воздействие различных изменений напряжения любого характера.

**Нормы отдельных ПКЭ.** Наиболее полно этот вопрос освещен в табл. 1 [2]. Со всеми приведенными значениями норм авторы согласны и считают их обоснованными, кроме позиций 3 и 4. Размах изменения напряжения следует оценивать по дозе фликера, о чем сказано выше. Доза фликера для сетей с промышленной нагрузкой должна быть разделена на две позиции:

1) для сетей с лампами накаливания; 2) для сетей с газоразрядными лампами.

Дополнительно следует ввести норму на провалы напряжения, создаваемые промышленными ЭП, о чем сказано выше.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железко Ю. С. О совершенствовании нормирования качества электроэнергии. — Электричество, 1987, № 4.
2. Мамошин Р. Р., Никифорова В. Н. О совершенствовании нормирования качества электроэнергии — Электричество, 1987, № 4.
3. Шидловский А. К., Куреный Э. Г. Введение в статистическую динамику систем электроснабжения. — Киев: Наукова думка, 1984.
4. Вагин Г. Я. Режимы электросварочных машин. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
5. Борисов Б. П., Вагин Г. Я. Электромагнитная совместимость электротехнологических установок и питающих сетей. — Техническая электродинамика, 1986, № 2.
6. Борисов Б. П., Вагин Г. Я. Электроснабжение электротехнологических установок. — Киев: Наукова думка, 1985.
7. Крахмалин И. Г. Исследование влияния качества электрической энергии на эффективность работы схем управления электроприемников: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Горький, 1982.
8. Солнцев Е. Б. Разработка технико-экономических характеристик электроприемников и узлов нагрузки машиностроительных предприятий при отклонениях напряжений и частоты: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Горький, 1986.

## Два учебника по электротехнике

Вышли из печати учебники по электротехнике — сначала книга Борисова Ю. И., Липатова П. И. и Зорина Ю. Н., а затем учебник под редакцией Герасимова В. Г., написанный коллективом авторов. Оба учебника появились в продаже зимой 1985—1986 гг. и в 1986/87 учебном году были рекомендованы студентам Московского авиационного института. К настоящему времени появилась возможность дать некоторую оценку этим учебникам.

В основном оба учебника соответствуют программе по электротехническим дисциплинам для неэлектротехнических специальностей высших учебных заведений, утвержденной Учебно-методическим управлением по высшему образованию 13 июля 1984 г.

Круг затронутых в учебниках тем примерно одинаков. Объем обоих по 31,7 учетно-издательских листов.

В первом учебнике материал разделен на двенадцать глав. В первой главе рассмотрены электрические цепи постоянного тока. Приводятся основные сведения о свойствах проводниковых и изоляционных материалов, параметрах элементов электрической цепи. Указаны методы расчета и краткие сведения о нелинейных электрических цепях постоянного тока. В конце главы говорится о принципе электрического моделирования.

Вторая глава посвящена электрическим цепям однофазного синусоидального тока. В этой же главе даются сведения о резонансных явлениях, круговых диаграммах и индуктивно связанных цепях. Третья и четвертая главы посвящены соответственно трехфазным цепям и переходным процессам. В пятой главе рассмотрены цепи периодического несинусоидального тока, приводятся сведения о сглаживающих фильтрах и о дифференцирующих и интегрирующих звеньях.

Шестая глава, названная «Электромагнитные устройства» разбита на три подглавы. В подглаве «А» приводятся сведения о величинах, характеризующих магнитное поле и свойства ферромагнитных материалов; даны основные методы расчета цепей с магнитотяжкими и магнитотвердыми материалами, приведено определение тягового усилия электромагнита. В подглаве «Б» посвященной магнитным цепям с переменной магнитодвижущей силой, сообщается о векторной диаграмме катушки с ферромагнитным магнитопроводом, построенной на основе замены несинусоидальных величин эквивалентными синусоидами. Приводятся сведения о феррорезонансном стабилизаторе напряжения. Подглава «В» названа «Магнитные цепи с постоянной и переменной магнитодвижущими силами», в ней рассмотрены дроссели насыщения и магнитные усилители.

Седьмая глава посвящена измерительным приборам и некоторым методам измерений электрических и магнитных величин. Приведены краткие сведения о цифровых приборах. Восьмая глава «Трансформаторы» и девятая «Машины постоянного тока» содержат традиционный материал; здесь, пожалуй, следует отметить, что помещенное в параграфе 9.22 сравнение коллекторных двигателей с асинхронными и синхронными преждевременно, поскольку речь о них идет ниже, где и надлежит сравнивать эти двигатели.

Глава десятая посвящена асинхронным машинам. Здесь рассмотрено получение вращающегося магнитного поля. Оценка изложения этого вопроса приведена ниже. В конце главы даны сведения об асинхронных тахогенераторах, сельсинах, вращающемся трансформаторе и линейном двигателе. Глава одиннадцатая рассматривает синхронные машины, в конце главы даны сведения о синхронных микродвигателях.

Все главы, кроме одиннадцатой, снабжены числовыми примерами. В конце учебника имеются предметный указатель и оглавление.

Во втором учебнике материал разделен на четыре раздела, охватывающих семнадцать глав. Материал, изложенный в этом учебнике, во многом аналогичен материалу первого учебника, и поэтому далее главы второго учебника охарактеризованы несколько короче.

Раздел первый «Электрические цепи» состоит из шести глав. Первая из них посвящена цепям постоянного тока, а вторая — цепям синусоидального тока. В третьей главе рассмотрены трехфазные цепи и вопросы техники безопасности при эксплуатации

этих цепей. Четвертая глава посвящена переходным процессам, а пятая — нелинейным электрическим цепям постоянного и переменного тока. В шестой главе рассмотрены периодические несинусоидальные токи в электрических цепях, электрические фильтры, дифференцирующие и интегрирующие цепи. Частотные свойства электрических цепей, включая резонансные явления, метод круговых диаграмм со взаимной индукцией рассмотрены во второй главе.

Второй раздел «Магнитные цепи и электромагнитные аппараты» состоит из четырех глав, в которых рассмотрены, соответственно, магнитные цепи постоянного потока, магнитные цепи переменного потока, электрические аппараты и трансформаторы.

Третий раздел «Электрические приборы и электрические измерения» охватывает две главы, посвященные электроизмерительным приборам и методам электрических измерений.

Четвертый раздел «Электрические машины и электропривод» включает четыре главы (тринадцатую — шестнадцатую). В тринадцатой главе сообщается об основных закономерностях, связывающих электромагнитные величины с механическими силами, рассмотрено получение вращающегося магнитного поля. В четырнадцатой главе рассмотрены машины постоянного тока, в пятнадцатой — асинхронные двигатели, в том числе однофазные, линейные и асинхронные тахогенераторы. В шестнадцатой главе приведены сведения о синхронных машинах. Семнадцатая глава посвящена основам электропривода.

В конце каждой главы даны контрольные вопросы, несомненно, полезные для учащихся. В 1, 2, 3, 11 и 13 главах приводятся исторические сведения, способствующие повышению интереса учащихся к материалу учебника. Однако некоторые элементы истории можно было бы и не приводить, как например, рисунок 13.4 и соответствующий текст о турбогенераторе Парсонса. Усвоению материала помогают примеры в главах 1, 2, 3, 11 и 13. В конце учебника имеются предметный указатель и оглавление, причем после каждого названия главы указаны авторы, написавшие ее.

Выскажем некоторые замечания, направленные на улучшение последующих изданий. В ряде случаев авторы не учли, что некоторые методические примеры, заимствованные из литературы, предназначенной для специалистов-электриков, нелегко воспринимаются неэлектриками. Например, в литературе для электриков при освещении процессов в однофазных трансформаторах принимается как согласное, так и встречное направление токов в двух обмотках относительно одноименных зажимов, причем во многих случаях предпочтение отдается согласному направлению, при котором ток намагничивания представляет собой сумму токов в обмотках.

В обоих учебниках процессы в однофазных трансформаторах излагаются на основе согласного направления токов в обмотках. Следствием такого подхода являются направления тока  $I_1$  на рис. 8.21 в первом учебнике и тока  $I_2$  на рис. 10.24 во втором учебнике. Как правило, студенты с большим трудом воспринимают эти направления токов, поскольку они противоположны направлению мощности от первичных зажимов к вторичным, т. е. к нагрузке, а также тому обстоятельству, что ток во вторичной обмотке физически размагничивает сердечник трансформатора.

Для неэлектриков слишком сложны построения на рис. 11.12 в первом учебнике и на рис. 16.20—16.22 во втором.

В обоих учебниках материал недостаточно согласован с учебной литературой по физике. Полезно было бы в некоторых случаях ссылаться на соответствующие выражения учебников физики.

Неточны термины: «Метод узлового напряжения» в первом учебнике и «Метод междуузлового напряжения» во втором, поскольку здесь идет речь об электрической цепи с двумя узлами, а эти термины могут быть приняты и для цепи с числом узлов более двух.

В первом учебнике черточки над буквенными обозначениями токов и напряжений на рис. 2.16, 2.17 и других противоречат не только ГОСТ 1494—77, но и давно установившейся традиции

обозначать черточками сверху ориентированные в пространстве векторы.

В соответствии с ГОСТ 1494—77 с учетом изменений № 1, утвержденных в мае 1983 г., под буквой, обозначающей комплексную величину, пишется черточка. В качестве резервных допускаются буквенные обозначения комплексных величин без каких либо черточек и точек. Представляется, что эти же правила следует применять и в случаях, когда комплексный метод не используется. При этом следует исходить из того, что применение комплексных чисел в электротехнике, т. е. символического метода, явилось дальнейшим развитием метода векторных диаграмм. Следует приветствовать увязку векторных диаграмм с комплексным методом в § 2.5, 2.6 и далее во втором учебнике. Здесь уместно было бы сообщить о роли американского ученого Ч. П. Штейнмеца в разработке символического метода и о письме В. И. Ленина этому ученому. Несомненно, что работы Штейнмеца в какой-то мере указали путь к применению функций комплексных переменных для анализа и синтеза электрических цепей и электромагнитных полей.

В первом учебнике черточки сверху (рис. 2.17 и др.) или черточки снизу (рис. 2.26 и др.) имеются только на векторных диаграммах, что же касается соответствующих схем, то здесь (например на схеме рис. 2.25) около стрелок, обозначающих токи и напряжения, вовсе нет напоминаний в виде каких-либо черточек о том, что законы Кирхгофа здесь должны применяться с учетом начальных фаз токов и напряжений.

В первом учебнике § 10.2 чересчур громоздко доказывается

получение вращающегося магнитного поля, причем только для трехфазной обмотки асинхронного двигателя. Проще и доступнее для студентов этот вопрос изложен в § 13.5 второго учебника, но и здесь нам кажется целесообразнее заменить в выражениях 13.30—32 какой-либо одной буквой.

Рассмотрение принципа работы машины постоянного тока без изображения коллектора, хотя бы в упрощенном виде, на рис. 14.1—3 во втором учебнике обедняет этот анализ. Схема, изображенная на рис. 2.60 второго учебника, названа схемой замещения в нарушение существующей традиции, поскольку в ней показано, что энергия из одного контура в другой передается посредством электромагнитной индукции.

Авторы обоих учебников привержены слову «понятие», которое порой может восприниматься так, что последующий текст не имеет практического применения. В некоторых случаях после текста, следующего за словом «понятие» целесообразны ссылки на литературу, где данный вопрос рассмотрен более подробно.

В тексте и на рисунках обоих учебников имеется немало второстепенных дефектов, в которых повинны не только авторы, но и работники издательства. В некоторых местах желательнее устранить личные обороты, не применяемые в технической литературе на русском языке. Создается впечатление, что во втором учебнике более выдержан единый стиль, чем в первом.

В целом следует отметить большой труд авторов обоих учебников, обеспечивший студентам возможность изучения электротехники на современном уровне, и пожелать авторам совершенствовать далее последующие издания.

ТИМОФЕЕВ А. Б., проф., КЛИМОВ В. П., доц., ТЕР-ЗАХАРЯН В. Г., доц.



### ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

20—21 октября 1987 г. в Смоленском филиале Московского ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции энергетического института проводится Всесоюзная научно-техническая конференция «Пути экономии и повышения эффективности использования электроэнергии в системах электроснабжения промышленности и транспорта».

Работа конференции будет проходить по следующим направлениям:

1. Теоретические исследования путей экономии и повышения эффективности использования электроэнергии.
  2. Экономия электроэнергии в системах электроснабжения.
  3. Экономия электроэнергии на электрическом транспорте.
  4. Экономия электроэнергии в электроприводе.
- Адрес для переписки: 105935, ГСП, Москва, Е-250, Красноказарменная ул., д. 14, Московский энергетический институт, кафедры:
- по первому направлению — электрических систем;
  - по второму — электроснабжение промышленных предприятий;
  - по третьему — электрического транспорта;
  - по четвертому — автоматизированного электропривода.
- Справки по телефону: 362-75-08 — ученый секретарь Оргкомитета к. т. н. Родина Людмила Сергеевна.

### ВНИМАНИЮ РУКОВОДИТЕЛЕЙ ОРГАНИЗАЦИЙ И ПРЕДПРИЯТИЙ!

В Энергоатомиздате в мае 1987 г. выходят бланк-заказы на плакаты по электробезопасности (включая предупреждающие, запрещающие, предписывающие, указательные); плакаты по экономии электрической и тепловой энергии.

Плакаты по электробезопасности иллюстрируют основные положения правил по технике безопасности, напоминают о мерах и приемах безопасной работы на электрических станциях и подстанциях, в энергетических системах, электроустановках промышленных предприятий и в промышленной теплоэнергетике, на предприятиях электротехнической промышленности, при пользовании электроэнергией в сельском хозяйстве и быту.

Плакаты по экономии электрической и тепловой энергии призывают экономить электроэнергию, топливо, показывают пути и средства их рационального расходования.

Бланк-заказ высылается издательством бесплатно по запросам организаций. В нем приведен полный перечень плакатов, а также указаны условия их получения и порядка оформления заказов.

За получением бланк-заказа следует обращаться по адресу:

113114, Москва, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат, Отдел распространения. Телефон для справок: 235-39-27.

Своевременно оформляйте заказы.

## IX Пленум Центрального правления НТОЭ и ЭП имени академика Г. М. Кржижановского

30 октября 1986 г. в Ленинграде состоялся IX Пленум Центрального правления научно-технического общества, который рассмотрел вопросы:

1. О важнейших научно-технических программах XII пятилетки и задачах организации НТОЭ и ЭП (докладчик — заместитель председателя Центрального правления, член-корреспондент АН СССР Н. Н. Тиходеев; содокладчик — первый заместитель председателя президиума ЦССЭ Минэнерго СССР, член-корреспондент АН СССР П. С. Непорожний).

2. О работе научно-технических журналов «Гидротехническое строительство» и «Промышленная энергетика» по пропаганде достижений науки и техники, передового опыта (докладчики — главный редактор журнала «Гидротехническое строительство» Н. А. Лопатин, заместитель главного редактора журнала «Промышленная энергетика» Л. А. Новелла).

Пленум открыл председатель Центрального правления НТОЭ и ЭП, член-корреспондент АН СССР, Герой Социалистического Труда Н. Н. Ковалев.

В работе Пленума приняли участие представители Минэнерго СССР, Минэлектротехпрома, Госплана СССР, ГКНТ СССР, организаций и предприятий отраслевых министерств, ведущие специалисты отраслей, НИИ, КБ, вузов, актив научно-технического общества, представители ЦК отраслевого профсоюза и ВСНТО.

Обсуждая работу организации НТОЭ и ЭП в выполнении научно-технических программ XII пятилетки, участники IX Пленума отметили, что стратегической задачей в области развития новой техники и технологии в электроэнергетике является дальнейшее совершенствование структуры генерирующих мощностей и системообразующих связей ЕЭС, повышение экономичности и надежности оборудования, коренное улучшение качественных показателей энергетического производства.

Определяя цели научно-технической общественности на предстоящий период, участники Пленума обсудили итоги выполнения важнейших программ XI пятилетки.

В течение 1981—1985 гг. вопросы выполнения научно-технических программ неоднократно обсуждались в первичных организациях, на Президиумах и Пленумах НТОЭ и ЭП.

Выполнению программ способствовали Всесоюзные научно-технические совещания и семинары, проводившиеся ежегодно Центральным правлением.

Однако, как было отмечено в докладе и в выступлениях, несмотря на систематичность постановки указанных вопросов сложившаяся в НТО система сопровождения хода выполнения научно-технических программ не эффективна.

Влияние общества на Минэнерго СССР, Минэлектротехпром, их головные организации и организации-соисполнители по этим вопросам недостаточно.

В результате не освоен головной энергоблок мощностью 1 ГВт с реакторами ВВЭР-1000 и быстроходной (3000 об/мин) турбиной на Ровенской АЭС, не было развернуто изготовление элегазового оборудования 1150 кВ и аппаратного комплекса для ППТ 1500 кВ и т. д.

Срывы и затяжка сроков выполнения заданий программ допущены и в первом году XII пятилетки. В частности, не был обеспечен ввод головного энергоблока 0,8 ГВт на Пермской ГРЭС. Медленно ведется сооружение и освоение подстанций 1150 кВ в Кустанае, Барнауле и Челябинске, значительно отстает от плановых сроков сооружение передачи постоянного тока 1500 кВ и др.

Участники Пленума указали, что XXVII съезд КПСС потребовал активизировать деятельность научно-технических обществ, и в процессе перестройки деятельности НТОЭ и ЭП необходимо не только всемерно повысить эффективность тра-

диционных методов работы общественности, но и вести смелый поиск новых форм, дающих возможность широкого использования инициативы ученых и специалистов, объединяемых Обществом.

Пленум принял по данному вопросу постановление, в котором обязал правления и организации НТОЭ и ЭП принять действенные меры по ускорению научно-технического прогресса, мобилизовать творческие усилия ведущих специалистов на реализацию целевых научно-технических программ. С целью активизации деятельности НТОЭ и ЭП ввести в практику отчеты членов секций и первичных организаций по обеспечению выполнения научно-технических программ XII пятилетки, внедрению неформальных методов работы, расширить практику общественного рецензирования крупных проектов, конструкторских решений, региональных проблем, шире обсуждать отраслевые стандарты и нормы и т. д.

При обсуждении вопроса о деятельности редколлегий журналов «Гидротехническое строительство» и «Промышленная энергетика» участники Пленума отметили большую организаторскую работу, проводимую редакционными коллегами и редакциями журналов по пропаганде достижений передового опыта и внедрению в жизнь важнейших научно-технических программ. На страницах журналов систематически выступают видные ученые, руководители министерств, научно-исследовательских институтов, предприятий и электростанций.

Журналы пользуются заслуженным авторитетом среди читателей, о чем свидетельствуют проведенные читательские конференции. Связь с НТОЭ и ЭП осуществляется через секции общества и членов редколлегии, входящих в ЦП НТОЭ и ЭП.

Однако редакционными коллегами использованы не все возможности по дальнейшему повышению эффективности деятельности журналов.

В постановлении Пленума по данному вопросу предлагается увеличить количество статей о передовом опыте в области организации труда, социалистического соревнования и управления производством. Подчеркнута необходимость публиковать больше дискуссионных и критических статей, добываясь от соответствующих хозяйственных органов скорейшего принятия мер по опубликованным материалам. Правлениям и первичным организациям НТОЭ и ЭП усилить организационную связь с редколлегиями и редакциями журналов, оказывать им практическую помощь в организации и проведении читательских конференций; шире информировать журналы о проводимых правлениями мероприятиях и о деятельности организации НТО.

Среди выступивших участников Пленума: заместитель начальника отдела энергетики и электрификации Госплана СССР В. И. Савин, который остановился на вопросах энергосберегающей политики; главный инженер Главтехуправления Минэнерго СССР В. В. Нечаев, отметивший некоторые аспекты выполнения научно-технических программ по Минэнерго СССР, заместитель начальника Техуправления МЭТП А. И. Подаруев, осветивший вопросы повышения качества электротехнического оборудования; директор Энергоатомиздата С. П. Розанов, рассказавший о задачах, стоящих перед отраслевыми журналами и издательством в свете решений XXVII съезда КПСС, и другие.

Пленум Центрального правления НТОЭ и ЭП выразил уверенность в том, что все члены Общества, включившись во всенародное соревнование за успешную реализацию решений съезда КПСС, примут меры по обеспечению выполнения заданий XII пятилетки, направленных на ускорение научно-технического прогресса в энергетике и электротехнической промышленности.

КУДРЯВЦЕВА О. Д., ученый секретарь ЦП НТОЭ и ЭП, ЛАНДЕР Л. А., инструктор ЦП НОЭ и ЭП



УДК 061.3:551.594

### III Всесоюзный симпозиум по атмосферному электричеству

(28—31 октября 1986 г. Тарту)

Тематика симпозиума явилась логическим продолжением и дальнейшим развитием вопросов, поднятых в 1983 г. на расширенном заседании IV секции Научного совета АН СССР по комплексной проблеме «Научные основы электрофизики и электроэнергетики» в Баку и на втором симпозиуме по атмосферному электричеству в 1982 г. в Ленинграде. В работе симпозиума приняли участие более 200 представителей из 85 организаций. Были заслушаны и обсуждены 255 докладов и сообщений по следующим основным направлениям: электрическое поле и общие проблемы атмосферного электричества; атмосферные ионы и аэрозоли; электричество облаков; атмосферерики и исследование грозовой деятельности; воздействие атмосферного электричества на технические средства и грозозащита; биологическое действие атмосферного электричества.

Доклады и дискуссии по ним показали, что накоплены данные систематических наблюдений в сети измерения атмосферного электричества, обнаружены особенности электрических полей в средней атмосфере, получены доказательства связей характеристик атмосферно-электрических полей с сейсмической активностью и магнитной возмущенностью, предложены методы эффективного обнаружения антропогенного загрязнения атмосферы по результатам измерения электрических характеристик, развиты исследования по теории структуры аэрионов и по моделированию физико-химических процессов зарядки аэрозольных частиц. На основе внедрения современных методов автоматизации экспериментов достигнуты существенно новые результаты в спектрометрии подвижностей аэрионов и аэрозольных частиц, впервые в СССР разработана численная модель развития конвективного облака, позволяющая учитывать электрические процессы, метод исследования облаков путем направленного активного воздействия на них, методы лабораторного моделирования процессов электризации облаков, созданы установки безэлектродного моделирования молниевых разрядов, радиотехнические системы комплексного исследования грозовых облаков и получены новые данные о процессах в этих облаках, ряд региональных карт повторяемости и продолжительности гроз, утвержденных Минэнерго СССР в качестве нормативных, усовершенствованы инструментальные методы метеопределения гроз, при этом разработаны и внедрены фазный анализатор грозоопасности, разностно-дальномерная и пеленгационная системы местоопределения гроз, уточнены модели электрического излучения молнии, в частности, выявлены особенности излучения в УКВ диапазоне, волновые характеристики канала молнии с учетом объемных зарядов, разработаны новые методы грозозащиты воздушных линий электропередач, получены новые данные о переходных процессах в подземных кабелях.

Несмотря на большую проделанную работу, симпозиум обращает внимание на ряд нерешенных научных вопросов и отмечает некоторые недостатки в организации и проведении научных исследований:

- не преодолена полностью разобщенность в исследованиях, хотя это было отмечено уже в решениях предыдущих симпозиумов в заседаниях IV секции;

- недостаточно координация исследований по атмосферному электричеству;

- мало используется автоматизация наблюдений, обработки и представления данных с применением современной вычислительной техники;

- недостаточно изучены требования различных потребителей к информации об электрическом состоянии облаков;

- отсутствует единый методологический подход к определению требований к методам и устройствам контроля электрического состояния облаков;

- не внедрены простые инструментальные методы обнаружения гроз на метеосети Госкомгидромета;

- не доведены до широкого внедрения методы искусственного воздействия на электричество облаков;

- практически отсутствуют работы по выявлению взаимосвязи между характеристиками атмосферного электричества и общей циркуляции атмосферы, имеющийся опыт и результаты моделирования общей циркуляции атмосферы не были использованы в разработках теории глобальной атмосферно-электрической цепи.

В целях развития работ по практическому использованию результатов исследования атмосферного электричества симпозиум считает необходимым:

- усилить координационную деятельность комиссии по атмосферному электричеству при МГК и расширить состав этой комиссии с учетом возникновения новых ведущих научных центров;

- активнее участвовать в международном сотрудничестве по атмосферно-электрическим исследованиям и сформировать предварительную делегацию на VIII Международную конференцию по атмосферному электричеству, возложив эти обязанности на ГГО и ТГУ;

- создать межведомственную редколлегия и приступить к регулярному изданию ежегодников «Атмосферное электричество».

Учитывая возросшую научную и практическую значимость развития работ в области атмосферного электричества применительно к нуждам народного хозяйства считать целесообразным и просить Президиум АН СССР заслушать на заседаниях отделения физико-технических проблем энергетики и отделения физики атмосферы и географии АН СССР проблемный доклад «О состоянии и перспективах развития работ в области атмосферного электричества», поручив ГГО подготовку такого доклада.

Просить Госкомгидромет совместно с АН СССР, Минэнерго СССР, Минвузом СССР, Минздравом СССР, Минприбором СССР рассмотреть вопрос о существенном развитии на территории СССР сети наблюдений за атмосферным электричеством, об оснащении ее современным приборным оборудованием и создании единых методических основ проведения наблюдений, сбора, обработки и распространения информации.

Просить Госкомгидромет обратиться в ВМО с просьбой рассмотреть возможность расширения мировой сети станций, производящих наблюдения за атмосферным электричеством в различных регионах земного шара, и направления этих данных в мировой центр по атмосферному электричеству при ГГО. Просить ГГО обеспечить снабжение этими данными заинтересованных потребителей.

Усовершенствовать систему обработки, хранения и анализа данных, предусмотрев создание базы данных на основе современных ЭВМ. Расширить исследования по взаимосвязи явлений атмосферного электричества с процессами в ионосфере и литосфере. Усилить работы по внедрению в практику методов индикации загрязнения атмосферы по данным измерений атмосферно-электрических величин.

Просить Госстандарт обеспечить государственной аттестацией атмосферно-электрические измерительные приборы.

На базе экспериментальных полигонов ГГО (Воейково, Гургоны), ВГИ и других заинтересованных организаций под методическим руководством ГГО развернуть комплексы радиотехнических средств исследования электрических параметров облаков с целью создания устройств контроля их электрического состояния для проведения сравнительных наблюдений за грозами различными системами грозооповещения.

Разработать единый методологический подход к определению требований к методам и устройствам обнаружения гроз.

Продолжить развитие направления «Цифровая обработка и моделирование атмосферников» в целях решения задачи определения местоположения и физических характеристик молниевых разрядов и грозовых очагов.

Развить работы по исследованию региональных особенностей характеристик грозовой деятельности. Просить ГГО, Минэнерго и Минвуз составить мировую карту распределения гроз методом стыковки существующих разрозненных локальных карт и представить ее для утверждения СКАЭ как стандарт. Считать целесообразным создание в ТГУ экспериментальной системы автоматизированных наблюдений за атмосферным электричеством хорошей погоды.

Продолжить работы в области грозозащиты энергетических сооружений, устройств связи, плавсредств и морских сооружений, а также разработки аппаратуры для получения атмосферного электричества и параметров молний.

ТАММЕТ Х. Ф., ХАЛИЛОВ Ф. Х., ШВАРЦ Я. М.

# Всесоюзное научно-техническое совещание «Проблемы оптимизации работы автоматизированных электроприводов»

(24—26 сентября 1986 г., Душанбе)

Совещание было организовано по инициативе Центрального правления НТОЭ и ЭП им. Г. М. Кржижановского и его секции «Электропривод и системы автоматического управления» при участии Таджикского политехнического института и Таджикского республиканского правления НТОЭ и ЭП.

В работе совещания приняли участие более 150 специалистов научно-исследовательских институтов, научно-производственных объединений, промышленных предприятий и вузов из 31 города Советского Союза. Заслушано более 100 докладов и сообщений, посвященных совершенствованию и оптимизации работы автоматизированных электроприводов.

Открыл совещание председатель Оргкомитета, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, д. т. н., проф. Ю. А. Сабинин. С приветствием от Таджикской ССР выступил зам. председателя Совмина Таджикской ССР Ю. П. Закаринский. О высшем образовании в республике сделал сообщение зам. министра Минвуза Таджикской ССР В. Г. Чекалин.

На пленарных заседаниях совещания были заслушаны доклады, в которых показаны основные достижения и определены дальнейшие направления работ по оптимизации функционирования автоматизированных электроприводов: «Перспективы развития общепромышленного электропривода и его элементной базы» (О. В. Слезановский); «Современное состояние и перспективы развития микропроцессорных систем управления электроприводами для гибких производственных модулей» (А. В. Башарин, С. В. Демидов, Б. Г. Коровин, В. А. Рыдов); «Состояние и тенденции развития электромеханических роботов» (С. Ю. Белов, С. К. Иванов, Е. И. Юревич); «Развитие и перспективы производства силовых транзисторов в ХП пятилетке для систем электропривода» (В. А. Потапчук); «Перспективы развития энергетики Таджикистана» (Б. С. Сирожев).

На заключительном заседании с сообщением о перспективах развития отечественного электропривода выступил директор ВНИИэлектропривод, д. т. н. М. Г. Юньков.

Основная работа совещания протекала в секциях.

На заседаниях секции «Проблемы оптимизации и интенсификации электроприводов» основное внимание было уделено созданию адаптивных приводов, нечувствительных к изменению параметров, системам оптимального управления, в том числе оптимального по быстрдействию разработкам систем автоматического проектирования приводов с оптимальными характеристиками.

Ряд докладов был посвящен частотному управлению приводами переменного тока и его модификациям.

Секция уделила внимание вопросам оптимизации работы приводов систем водоснабжения и орошения земель, приводам производственных агрегатов хлопко-обрабатывающей промышленности.

На секции «Элементы и устройства современных электроприводов» значительная часть докладов была посвящена силовым полупроводниковым преобразователям, транзисторным ключам, повышению надежности и упрощению структуры преобразователей, в том числе ШИП.

Большое внимание было уделено созданию бесконтактных двигателей постоянного тока, разработке вентильных двигателей для роботов и металлорежущих станков, построению датчиков положения, скорости и т. п. повышенной чувствительности и надежности. Также были заслушаны доклады, касающиеся создания двигателей для обработки микроперемещений—электромеханических, пьезоэлектрических, необходимых для оптических комплексов и прецизионного станкостроения.

Секция «Автоматизированные электроприводы гибких производственных систем» в основном занималась вопросами электропривода электромеханических роботов и устройств ЧПУ металлорежущих станков. Некоторое внимание также было уделено приводам транспортных средств гибкого автоматизированного производства. Преимущественно рассматривались вопросы цифрового управления и, в первую очередь, применению микропроцессоров в приводах ГАП. Ряд докладов был посвящен созданию адаптивных приводов, нечувствительных к изменению параметров, в том числе к вариациям момента инерции в приводах роботов.

Рассматривались вопросы создания бесконтактных приводов переменного тока с частотным и векторным управлением применительно к ГАП.

Секция «Микропроцессорные системы управления электроприводами» в своих докладах и прениях рассматривала вопросы прямого цифрового управления с ЭВМ в контуре управления, синтеза цифровых регуляторов, построения систем управления с использованием микропроцессоров, в том числе приводов с частотным и частотно-токовым управлением на базе микропроцессоров. Было уделено внимание применению микропроцессоров в системах управления ГАП и в системах управления многомассовыми объектами. Интересное сообщение было сделано по вопросу наладки микропроцессорных систем и использованию специальных настроечных устройств.

Представители таджикских организаций познакомили участников совещания с работами по приводам с микропроцессорами в контуре управления для механизмов текстильного производства.

Совещание приняло развернутое решение. Для дальнейшего совершенствования и развития автоматизированных электроприводов намечены следующие основные направления работ.

По проблеме оптимизации автоматизированных электроприводов:

развитие и совершенствование методов и технических средств систем автоматизации проектирования, в том числе автоматизации выбора оптимальных технических решений;

развитие работ по созданию оптимальных по быстрдействию, точности воспроизведения траекторий, энергопотреблению, надежности и другим показателям электроприводов на базе перспективных типов двигателей постоянного и переменного тока с различными способами управления и преобразования энергии;

развитие работ по созданию адаптивных электроприводов с различными видами идентификаторов и развитию методов реализации нечувствительности к изменению параметров.

По проблеме повышения качества, надежности и экономичности элементов узлов автоматизированных электроприводов:

повышение качества и надежности преобразователей напряжения, тока и частоты с целью улучшения их технико-экономических показателей и обеспечения совместимости с питающей сетью;

повышение надежности и расширение номенклатуры тиристорных и транзисторных модулей;

создание и внедрение в производство электродвигателей для частотно-регулируемых приводов переменного тока, двигателей возвратно-поступательного движения для работ технических комплексов и гибких производственных систем, бесконтактных двигателей постоянного тока, микроэлектродвигателей, электромагнитных и пьезоэлектрических двигателей;

создание в модульном исполнении аналоговых и цифровых датчиков перемещения, скорости, тока, напряжения и т. п.

По проблеме создания электромеханических модулей для промышленных роботов, робототехнических комплексов и гибких производственных систем:

дальнейшее развитие теории и практики построения электроприводов высокой точности для механизмов с изменяющимися параметрами и упругими элементами;

создание многосвязных систем электропривода для многокоординатных робототехнических комплексов и модулей гибких производственных систем;

разработка и внедрение в производство типовых электромеханических модулей для роботов, манипуляторов, гибких производственных систем, работающих в общепромышленных и особых условиях, с двигателями постоянного и переменного тока и нетрадиционными преобразователями энергии;

создание прецизионных микропроцессорных и других видов цифрового управления;

дальнейшее развитие теории и практики построения систем многопроцессорного управления, их диагностирования, математического и программного обеспечения;

накопление и обобщение программного и математического обеспечения микропроцессорных систем управления;

совершенствование систем числового программного управления станками;

развитие методов автоматизированного проектирования, исследования и настройки электроприводов с микропроцессорным управлением;

реализация на микропроцессорных принципах оптималь-

ного, адаптивного и других видов управления, повышающих эффективность работы электроприводов;

внедрение систем электроприводов с микропроцессорными управлениями для станков с ЧПУ, промышленных роботов и манипуляторов, модулей ГПС, поточных линий, прецизионных механизмов и комплексов, многомассовых механизмов.

Для организации улучшения работ по оптимизации автоматизированных электроприводов совещание приняло решение, в котором сформулировано ряд рекомендаций.

ГКНТ СССР, Минвузу СССР, Минэлектротехпрому, Минприбору и Минстанкопрому рекомендовано усилить координацию научных исследований и ОКР по работам в области создания оптимальных систем электроприводов преимущественно с микропроцессорным управлением, шире используя отраслевые и межотраслевые целевые программы.

Минвузу СССР шире практиковать по прямым связям с отраслевыми министерствами, с головными научно-исследовательскими институтами и научно-производственными объединениями интенсивную подготовку специалистов, способных решать задачи проектирования и использования современных систем электроприводов с микропроцессорным управлением в робототехнических комплексах, модулях гибких производственных систем, станках с ЧПУ и другим технологическим оборудованием. При подготовке инженеров по электроприводу и автоматизации промышленных установок поднять уровень их знаний в области современной теории автоматического управления и ее приложениях с учетом необходимости создания систем

управления с широким использованием вычислительных средств.

Минэлектротехпрому:

организовать промышленное производство более совершенных датчиков основных параметров для аналоговых и цифровых систем управления;

ускорить работы по освоению производства для станкостроения и робототехники вентиляльных двигателей с постоянными магнитами комплектно с датчиками;

разработать типовые комплексные микропроцессорные системы управления для приводов постоянного и переменного тока.

Министерствам электронной, приборостроительной и радиотехнической промышленности:

наладить выпуск микропроцессоров для устройств управления электроприводами постоянного и переменного тока с полным набором периферийного оборудования;

улучшить координацию работ по решению задач микропроцессорного управления электромеханическими системами с другими заинтересованными министерствами.

Минвузу Таджикской ССР и Управлению Таджикэнерго обратить особое внимание на разработку и использование наиболее прогрессивных типов электроприводов для управления промышленными агрегатами, характерными для производства Таджикской ССР. Рекомендовано усилить научный поиск и практическую реализацию совершенных систем электроприводов хлопкообрабатывающей, хлопкоочистительной промышленности и систем ирригации. Уделить особое внимание вопросам автоматизации режимов работы малых ГЭС, гелиоустановок, ирригационных систем и управлению их механизмами.

САБИНИН Ю. А., КУЛИКОВ С. Н.

## Механик и энергетик

(К 100-летию со дня рождения профессора Н. П. Виноградова)

Николай Павлович Виноградов родился в 1886 г. В 1914 г. окончил Петербургский технологический институт по механическому отделению и поступил в лабораторию сопротивления материалов Петроградского политехнического института на должность младшего лаборанта. С 1915 г. Николай Павлович стал преподавать на механическом факультете.

Еще будучи студентом Николай Павлович заинтересовался устойчивостью сжатых составных стержней. Этот вопрос в тот период привлекал внимание исследователей в связи с знаменитой катастрофой Квебекского моста (США), разрушившегося в результате потери устойчивости одного из сжатых составных стержней. Катастрофа произошла еще в период строительства, мост упал в реку под нагрузкой собственного веса. Бывшие на мосту 74 человека погибли.

После этой катастрофы начало теоретическому исследованию устойчивости составных стержней было положено за границей Энгессером и Прандтлем, в России — С. П. Тимошенко. Было установлено, что меньшая критическая нагрузка сжатых решетчатых стержней обуславливается деформацией решетки, вызываемой действием поперечной силы, возникающей в изогнутом стержне.

В своей работе Николай Павлович выводит общее выражение для критической нагрузки, более точное в сравнении с имевшимися до него. Основываясь на этом общем решении, Николай Павлович дает выражения для критической нагрузки составных стержней при различных конструкциях соединительной решетки. При этом оказалось, что в потерявшем устойчивость стержне Квебекского моста перед катастрофой критические напряжения были почти на 10 МПа меньше расчетных. Далее Николай Павлович выясняет усилия, действия которых подввергаются элементы связей при сжатии стержня, приводит основные соображения о расчете этих элементов и касается расчета их крепления к поясам составного стержня.

Написанная в 1913—1914 гг., эта работа была опубликована в 1914 г. в ряде номеров журнала «Вестник общества технологов» и представляет собой ценный вклад в строительную механику.

В Политехническом институте Николай Павлович преподавал сопротивление материалов, строительную механику и металлические конструкции, занимая с 1930 г. должность профессора.

В связи с Ленинским планом электрификации страны началось строительство линий электропередач большой протяженности и мощности. Вопросы механического оборудования этих линий и, в первую очередь, конструкции опор вызвали у Николая Павловича большой интерес. В 1921 г. в «Технико-эко-

номическом вестнике» публикуется первая статья Николая Павловича, посвященная опорам для высоковольтных линий электропередач. В ней автор рассматривает рациональные типы опор, указывает пути, по которым нужно идти в этом направлении, делает критический разбор существующих конструкций, приводит ряд рекомендуемых их конструкций, расположив их в порядке расширения сферы применения.

С тех пор основные научные интересы Николая Павловича сосредотачиваются на вопросах линий электропередач.

В практической деятельности Н. П. Виноградова в тот период можно отметить также работы по созданию мачты высотой 65 м при переходе через р. Неву линии электропередачи Волхов — Ленинград, создание мачты высотой 80 м при переходе через р. Неву линии электропередачи в г. Шлиссельбурге и многие другие.

В 1930 г. впервые в Советском Союзе на электромеханическом факультете Политехнического института Н. П. Виноградов создает следующие новые курсы: механический расчет и конструкция радиомачт и радиостетей; механический расчет и конструкция электрических линий высокого напряжения.

Для проведения научно-исследовательских работ, связанных с проектированием и сооружением высоковольтных линий электропередач, по инициативе и под научным руководством Николая Павловича создается в 1932 г. лаборатория под названием «Группа линий передач».

Основные направления работ этой группы:

опоры — разработка специальных методов расчета, испытания конструкций, теоретические работы в области расчета опор; провода — механические, тепловые и электрические исследования и проектирование новых типов;

вибрации проводов — исследование естественной вибрации, проектирование и расчет приспособлений, демпфирующих вибрацию проектирование приборов, необходимых для исследований, а также приборов, регистрирующих вибрацию на линиях; исследование элементов линий при динамических воздействиях (обрыв проводов);

арматура — механические, тепловые и электрические исследования и проектирование новых типов;

фундаменты — проектирование и исследование заложения опор;

консультации, техпомощь, выезды на места сооружения линий.

Таким образом, тематика группы охватывала все механические вопросы проектирования, строительства и эксплуатации линий электропередач. При этом главное внимание уделялось опорам, поскольку значительная часть стоимости линий электро-

## Валентин Андреевич Веников

(К 75-летию со дня рождения)

В апреле с.г. исполняется 75 лет со дня рождения и 53 года инженерной, научной и педагогической деятельности крупного советского ученого-энергетика, члена КПСС, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, лауреата Ленинской и Государственной премий, лауреата премии им. Яблочкова АН СССР, доктора технических наук, Почетного доктора Дрезденского университета, заслуженного изобретателя СССР, профессора Валентина Андреевича Веникова.

После окончания в 1936 г. Московского энергетического института В. А. Веников работал в Энергетическом институте АН СССР, где занимался научными исследованиями в новой тогда области физического моделирования электроэнергетических систем. В результате разработки этой темы В. А. Веников опубликовал ряд работ и защитил в 1941 г. кандидатскую диссертацию.

Во время Великой Отечественной войны В. А. Веников как военный инженер 2-го ранга был откомандирован АН СССР для выполнения заданий Технического управления Военно-Воздушных Сил Красной Армии, связанных с совершенствованием электроэнергетических систем боевых самолетов.

После окончания войны его трудовая деятельность неразрывно связана с МЭИ, где он начал работать еще в 1937 г. по совместительству в качестве ассистента профессора П. С. Жданова. При этом блестяще проявились его способности педагога и ученого.

В. А. Веников внес большой вклад в целый ряд разделов электроэнергетики; он известен фундаментальными работами по теории подобия и физического моделирования, устойчивости и применению кибернетики, является руководителем создания первой в мире электродинамической (физической) модели электрических систем.

Академия наук СССР, высоко оценив эти работы, присудила В. А. Веникову премию им. Яблочкова за вышедшую в 1949 г. книгу «Применение теории подобия и моделирования в электротехнике», научные концепции которой послужили основой многих последующих исследований в этой области как в СССР, так и за рубежом.



В 1952 г. он защитил докторскую диссертацию.

За комплекс теоретических и экспериментальных исследований, связанных с созданием первой сверхдальней линии передачи 500 кВ Куйбышев — Москва и других уникальных линий, изучение работы сложных электроэнергетических систем при переходных процессах, их управление и регулирование, В. А. Веников в 1958 г. был удостоен Ленинской премии. За книги, популяризирующие технические науки, он был удостоен премии общества «Знание», а за научные работы — премии и медали ВДНХ. В настоящее время он имеет более 400 печатных трудов, в том числе 50 книг и брошюр и 40 изобретений.

В МЭИ В. А. Веников работал ассистентом, доцентом, профессором, деканом факультета, заместителем директора по научной работе, с 1953 г. возглавляет кафедру электрических систем.

Созданные В. А. Вениковым курсы «Переходные электромеханические процессы в электрических системах», «Кибернетика электрических систем», «Моделирование в электроэнергетике», «Введение в специальность», «Дальние электропередачи» и учебники по

ним отличаются широким применением современных математических методов, новизной решения электротехнических задач.

Большой опыт постановки и чтения лекционных курсов, в которых широко применяется предложенная В. А. Вениковым «активизация учебного процесса», получает отражение в практике преподавания, ей уделяется внимание в учебниках и учебных пособиях. За ставший классическим, многократно издававшийся и переиздававшийся на русском и других языках учебник «Переходные электромеханические процессы в электрических системах» В. А. Веников в 1981 г. удостоен Государственной премии СССР, изданные под его редакцией восемь томов серии книг «Электрические системы» стали настольным пособием энергетиков.

Под руководством В. А. Веникова успешно выполнили и защитили докторские и кандидатские диссертации более 150 специалистов, работающих как в СССР, так и в 19 различных странах. Созданная им в МЭИ одна из первых в стране проблемная лаборатория электрических систем, научным руководителем которой он являлся, внесла существенный вклад в решение ряда важных задач в области исследования режимов, устойчивости, регулирования сложных электроэнергетических систем. Разработанный под его руководством в проблемной лаборатории цифро-аналогофизический комплекс явился действенным инструментом исследования таких систем с позиций кибернетического подхода к управлению их работой.

В. А. Веников вел и ведет большую научно-общественную работу в качестве члена НТС и Координационного Совета Минэнерго СССР, заместителя председателя секции электротехники ГКНТ СССР, председателя Научно-методического Совета по электроэнергетическим специальностям и секции электротехники и электроэнергетики НТС Минвуза СССР. Ряд лет он являлся председателем секции Научного Совета АН СССР «Кибернетика электроэнергетических систем», будучи членом Президиума Всесоюзного Общества «Знание» работал председателем Научно-методического совета по воп

передач приходится на сооружение опор. Вопрос о снижении массы опор приобретает особое значение при сооружении длинных линий.

За время своего существования, т. е. до Великой Отечественной войны, группа проделала большую работу, выполняя заказы Главэнерго, Мосэнерго, Энерготреста, Ленэнерго, Крымэнерго, Кузбассети и ряда других организаций. В 1939 г. начались научно-исследовательские работы по линиям передачи Куйбышевского узла.

Следует также отметить, что на протяжении всей своей научной деятельности Николай Павлович проявлял интерес к исследованиям стальных канатов. Первой работой по этой теме можно считать экспериментальное исследование сопротивления проволоки перерезанию. Оно было выполнено в 1916 г., когда вырабатывались способы борьбы с проволочными загрязнениями и одним из рациональных способов считали резание проволоки специальными ножницами. Из работ по исследова-

нию канатов можно назвать следующее: расчет несущего каната кабель — крана; подпрыгивание гибкой нити при сбросе нагрузки; расчет гибкой нити при действии системы распределенных и сосредоточенных нагрузок.

Наконец, в последние годы жизни Николай Павлович посвящает свою научную деятельность определению напряжений в стальных канатах с учетом пластических деформаций.

Николай Павлович Виноградов был воспитателем нескольких поколений инженеров. За время своей многолетней педагогической деятельности он работал деканом факультета производственного машиностроения и механического факультета, а также заведующим кафедрой подъемно-транспортных машин. Ученики с благодарностью и любовью вспоминают своего учителя.

Имя Николая Павловича Виноградова, внесшего большой вклад в становление и развитие советской науки, не будет забыто.

## Николай Васильевич Шилин

(К 60-летию со дня рождения)

28 февраля директору Научно-исследовательского центра по испытанию высоковольтной аппаратуры (НИЦ ВВА), доктору технических наук Николаю Васильевичу Шилину исполнилось 60 лет.

Н. В. Шилин окончил Московский энергетический институт в 1951 г. Начав свою трудовую деятельность на кафедре «Электрические аппараты» МЭИ, он прошел путь от инженера-конструктора до ассистента и заместителя декана электромеханического факультета. С 1960 г. он работал во ВНИИЭ заместителем заведующего лабораторией высоковольтных аппаратов и заведующим лабораторией разрывных мощностей. После преобразования этой лаборатории в 1964 г. в НИЦ ВВА назначается его директором. Одновременно длительное время Н. В. Шилин руководил одной из ведущих лабораторий Центра — лабораторией больших мощностей.

После перехода на руководящую работу Н. В. Шилин возглавил научно-техническую деятельность Центра как научный руководитель в разработке проблем совершенствования методов исследований и испытаний, создания и модернизации силовоточного электротехнического оборудования высокого напряжения.

Под его руководством проведено освоение уникальных испытательных установок и современных методов испытаний такого оборудования, что позволило НИЦ ВВА занять ведущее место среди экспериментальных баз в области высоковольтного электроаппаратостроения страны. В НИЦ ВВА впервые в СССР стали проводиться систематические испытания мощных силовых трансформаторов на динамическую стойкость, исследования дуго-



стойкости изоляторов для ЛЭП 110—750 кВ, испытания силовых кабелей на термическую устойчивость и др.

Николай Васильевич внес большой творческий вклад в развитие методов расчета и теории дуговых процессов в маслонаполненном электротехническом оборудовании высокого напряжения. Под его руководством и при личном участии выполнены фундаментальные исследования физических процессов, происходящих при горении и гашении дуги в масляных выключателях и турбогенераторах с бумажно-масляной изоляцией обмоток статора, что позволило создать научно-технические основы повышения технических параметров этого оборудования.

Выполненные под руководством Н. В. Шилина научные разработки имеют широкое практическое применение. На их основе осуществлено

централизованное изготовление узлов и деталей для модернизации выключателей высокого напряжения с повышением их коммутационной способности, разработаны новые серии масляных выключателей 10 и 35 кВ, КРУ и КРУН, которые внедряются в энергосистемах страны.

Н. В. Шилин является автором свыше 70 научных работ и 13 авторских свидетельств в области коммутационной аппаратуры, методов ее исследования и испытания.

Многогранна научно-общественная деятельность Н. В. Шилина. В 1968—1985 гг. он был постоянным членом Исследовательского Комитета 13 СИГРЭ «Коммутационные аппараты», членом рабочих групп этого Комитета, неоднократно представлял Советский Союз на международных электроэнергетических конференциях, заседаниях подкомитета 17А Международной электротехнической комиссии, состоит членом научно-технических советов ГКНТ, Минэнерго СССР, Минэлектротехпрома, членом редколлегии журнала «Электричество», организовал и в течение многих лет проводил семинар по физике гашения дуги.

В течение 17 лет Н. В. Шилин избирался депутатом Дзержинского и Кировского районных советов народных депутатов Москвы.

Н. В. Шилин награжден орденом Трудового Красного Знамени, медалями и почетными знаками.

Вся научная и научно-организаторская деятельность Николая Васильевича Шилина является примером творческого энтузиазма, неразрывной связи теории с инженерной практикой.

Группа товарищей, редакция и редколлегия журнала «Электричество»

росам промышленности. За работу в обществе «Знание» он занесен в книгу Почета. Двадцать лет В. А. Веников был вице — президентом общества СССР — Великобритания, организуя научно-общественные связи двух стран. Он плодотворно работает в редколлегии журналов «Электричество», «Известия АН СССР. Энергетика и транспорт», «Известия вузов СССР Энергетика», Реферативном журнале ВИНТИ, а также в редколлегии

международного журнала «Electrical Power Energy» (Лондон), является членом редакционных советов издательства «Высшая школа», «Мир».

В течение 30 лет (1952—1982 гг.) он — постоянный (от СССР) член научного комитета по режимам систем Международного конгресса по большому электрическому системам (СИГРЭ); в 1962 г. был одним из организаторов Международной конференции по применению вычислительных методов в

электроэнергетике (РСКК) и с тех пор является членом ее оргкомитета.

Научная, педагогическая и общественная деятельность В. А. Веникова отмечена высокими правительственными наградами. Он награжден орденом Ленина, орденом Дружбы народов, тремя орденами «Знак Почета», шестью медалями, многими почетными грамотами и знаками.

Группа товарищей, редакция и редколлегия журнала «Электричество»

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

<p>Гринштейн Б. И., Жмуров В. П., Тимошенко А. Л., Безуглый С. Л., Котляр В. П. Электрические воздействия на тиристорный источник импульсного питания в электрофильтре газоочистки . . . . .</p> <p>Коськин Ю. П., Смирнова Н. Н. Расчет переходных процессов в автономных электроэнергетических системах</p> <p>Бахманн У., Ванин В. К., Гиновкер А. М., Павлов Г. М., Печковский А. В. Синтез измерительных органов защиты как градиентной самонастраивающейся системы</p> <p>Железко Ю. С.; Мамошин Р. Р., Никифорова В. Н. О совершенствовании нормирования качества электроэнергии</p> <p>Исаев И. П., Козлов Л. Г., Глущенко М. Д. Методы моделирования электрических нагрузок при программировании режимов ускоренных стендовых испытаний тяговых электродвигателей локомотивов . . . . .</p> <p>Зозулин Ю. В., Кильдишев В. С., Черемисов И. Я., Кешишев В. Г. Влияние значения номинальной частоты переменного тока на показатели турбогенераторов больших мощностей . . . . .</p> <p>Милых В. И. Электродинамические процессы в экранах многополюсной системы возбуждения сверхпроводникового двигателя постоянного тока</p> <p>Канискин В. А., Середя Г. Г., Румянцев Д. Д., Хренков Н. Н. Исследование влияния термокриоцикли-</p>	<p>43</p> <p>1</p> <p>5</p> <p>9</p> <p>15</p> <p>27</p> <p>33</p> <p>37</p>	<p>ческих воздействий на электрическую прочность полимеров . . . . .</p> <p><b>СООБЩЕНИЯ</b></p> <p>Борцов Ю. А., Пашков Н. Н., Юнгер И. Б. Управление асинхронным двигателем с использованием скользящих режимов нелинейной модели . . . . .</p> <p>Нэмени Т. М. Численный расчет магнитных и тепловых полей в электрических машинах и аппаратах методом исключения с декомпозицией . . . . .</p> <p>Гашимов М. А., Гусейнов А. М. Диагностирование неисправностей электроэнергетических машин при межфазных замыканиях в обмотке статора . . . . .</p> <p>Павлович С. Н. Влияние угла инвертирования непосредственного преобразователя частоты на режим вытеснения вентильной группы . . . . .</p> <p>Чабан В. И. Дифференциальные и статические параметры в расчетах нелинейных электромагнитных цепей</p> <p>Зекцер Д. М. Результаты исследования магнитной проводимости рассеяния плоских магнитопроводов . . . . .</p> <p><b>ДИСКУССИИ</b> . . . . .</p> <p><b>БИБЛИОГРАФИЯ</b> . . . . .</p> <p><b>ХРОНИКА</b> . . . . .</p>	<p>43</p> <p>47</p> <p>49</p> <p>53</p> <p>56</p> <p>57</p> <p>58</p> <p>60</p> <p>71</p> <p>73</p>
--	--	---	---

## C O N T E N T S

<p>Greenstein B. I., Zhmurov V. P., Timoshenko A. L., Bezugly S. L., Kotliar V. P. — Electrical Impacts on a Thyristor Pulse Supply Source in an Electrostatic Precipitator for Gas Gleaning</p> <p>Koskin U. P., Smirnova N. N. — Transient Analysis of Self-Contained Electric Power Systems</p> <p>Bachmann U., Vanin V. K., Ginovker A. M., Pavlov G. M., Pechkovski A. V. — Synthesis of Measuring Elements for a Relay Protection Considered as a Self-Adjusting System</p> <p>Zhelezko U. S., Mamoshin R. R., Nikiforova V. N. — On Perfection of Electric Power Quality Standardization</p> <p>Isayev I. P., Kozlov L. G., Gluschenko M. D. — Methods for Electric Load Simulation in Programming the Conditions for Accelerated Bench Tests of Locomotive Traction Motors</p> <p>Zozulin U. V., Kildishev V. S., Cheremisov I. J., Keshishev V. G. — How the Rated AC Frequency Influences the Characteristics of Large Turbo-Generators</p> <p>Milikh V. I. — Electrodynamical Phenomena in the Screens of a Multi-Pole Excitation System for a DC Superconducting Motor</p> <p>Kaniskin V. A., Sereda G. G., Rumiantsev D. D., Khrenkov N. N. — How Thermocryoperiodic Impacts Influence the Electric Withstand Strength of Polymers . . . . .</p>	<p>43</p> <p>1</p> <p>5</p> <p>9</p> <p>15</p> <p>27</p> <p>33</p> <p>37</p> <p>43</p>	<p><b>REPORTS</b></p> <p>Bortsov U. A., Pashkov N. N., Younger I. B. — Induction Motor Control Employing Zero-Overshoot Response in a Non-Linear Model . . . . .</p> <p>Nemeni T. M. — Numerical Calculation of Magnetic and Thermal Fields in Electrical Machines and Apparatus By a Substitution Method With Decomposition . . . . .</p> <p>Gashimov M. A., Guseinov A. M. — Diagnosis of Defects in Electrical Machines for Phase-to-Phase Stator Winding Faults . . . . .</p> <p>Pavlovitch S. N. — How the Inverting Angle of the Frequency Converter Itself Influences Displacement Conditions for a Rectifier Group . . . . .</p> <p>Chaban V. I. — The Differential and Static Parameters Employed in Calculations of Non-Linear Electromagnetic Circuits . . . . .</p> <p>Zektser D. M. — A Study of the Permeance of Plane Magnetic Circuit Leakage . . . . .</p> <p><b>DISCUSSION</b> . . . . .</p> <p><b>BIBLIOGRAPHY</b> . . . . .</p> <p><b>CHRONICLE</b> . . . . .</p>	<p>43</p> <p>47</p> <p>49</p> <p>53</p> <p>56</p> <p>57</p> <p>58</p> <p>60</p> <p>71</p> <p>73</p>
---	--	---	---

# Рефераты публикуемых статей

УДК 621.359.48:621.373

Электрические воздействия на тиристорный источник импульсного питания в электрофильтре газоочистки. Гринштейн Б. И., Жмуров В. П., Тимошенко А. Л., Безуглый С. Д., Котляр Б. П. — «Электричество», 1987, № 4.  
На математической модели тиристорного источника импульсного питания электрофильтра газоочистки проанализированы воздействия на этот источник в рабочих и аварийных режимах электрофильтра. Результаты расчетов на ЦВМ сопоставлены с натурными испытаниями тиристорного источника на промышленном электрофильтре. Библ. 6.

УДК 621.311.018.782.3.001.24:681.142-523.8

Расчет переходных процессов в автономных электроэнергетических системах. Косыкин Ю. П., Смирнова Н. Н. — «Электричество», 1987, № 4

Предложены общий алгоритм и программный комплекс для исследования переходных процессов в автономных электроэнергетических системах любой структуры. В качестве исходных использованы непроброзованные дифференциальные уравнения электрических машин. Описан новый алгоритм численного решения, основанный на том, что элементы обратных матриц индуктивностей электрических машин являются периодическими тригонометрическими функциями угла рассогласования их статорных и роторных систем. Указанное положение относится к электрическим машинам как с ненасыщенной, так и с насыщенной магнитными цепями. Разработанная математическая модель позволяет исследовать переходные процессы в энергетической системе с существенно меньшими затратами машинного времени, чем в случае моделей с преобразованными уравнениями Парка — Горевы. Библ. 12.

УДК 621.316.925.45.001.3

Синтез измерительных органов защиты как градиентной самонастраивающейся системы. Бахманн У. Ванин В. К., Гринюккер А. М., Павлов Г. М., Печковский А. В. — «Электричество», 1987, № 4

Показана возможность построения дистанционных измерительных органов с приемлемыми характеристиками и достаточно простой реализацией на основе теории идентификации динамических объектов. Подтверждены экспериментально преимущества динамического контроля, обеспечивающего высокое быстродействие и достоверность. Библ. 9.

УДК 621.313.322-81.004.15

Влияние значения номинальной частоты переменного тока на показатели турбогенераторов больших мощностей. Зозулин Ю. В., Кильдишев В. С., Черемисов И. Я., Кешисев В. Г. — «Электричество», 1987, № 4

Определены предельные мощности турбогенераторов при повышенных частотах. Проанализированы основные технико-экономические показатели турбогенераторов предельных мощностей на повышенных частотах и турбогенераторов при промышленной частоте. Библ. 8.

УДК 621.313.13.024.014.4.001.24

Электродинамические процессы в экранах многополюсной системы возбуждения сверхпроводникового двигателя постоянного тока. Милых В. И. — «Электричество», 1987, № 4

Решена задача электродинамических процессов, возникающих в медных экранах полюсных криостатов в многополюсной системе возбуждения СП-двигателя постоянного тока при его работе с нагрузкой, изменяющейся периодически по сложному закону. Решение для экранных токов ищется в виде гармонических рядов и достигается на основе представления экранов совокупностью элементарных контуров. Индуктивные параметры контуров определяются в полевой постановке численным методом.

На основе полученного решения проводится анализ электродинамических процессов при конкретных исходных параметрах СП-двигателя и экранов с использованием предположительно заданной функции тока нагрузки СП-двигателя. Библ. 10.

УДК 621.313.333.078

Управление асинхронным двигателем с использованием скользящих режимов нелинейной модели. Борцов Ю. А., Пашков Н. Н., Югер И. Б. — «Электричество», 1987, № 4

Реализация скользящих режимов на нелинейной модели асинхронного двигателя рассмотрена для наиболее распространенного трехконтур-

ного способа регулирования переменных. Определены условия, при которых вектор прямого разрывного управления в контуре фазных токов статора формирует режим источника тока автономного инвертора напряжения. Для регулирования неизмеряемых потокосцепления ротора и момента двигателя разработаны два варианта моделей: с поддержанием постоянного потокосцепления ротора и подчиненным контуром регулирования момента на валу двигателя. Экспериментально и цифровым моделированием выявлено, что разрывное управление на скользящих движениях нелинейной модели адаптивно подавляет параметрические и сигнальные возмущения и обеспечивает линейные свойства асинхронного электропривода с заданным качеством динамики. Библ. 4.

УДК 621.313.013.001.24

Численный расчет магнитных и тепловых полей в электрических машинах и аппаратах методом исключения с декомпозицией. Нэмен Т. М. — «Электричество», 1987, № 4.

Рассмотрены методы декомпозиции, существенно расширяющие возможности метода исключения, применяемого для расчета магнитных и тепловых полей. Декомпозиция состоит в разделении исходной области задания поля (прямоугольника) на ряд подобластей и исключении внутренних горизонталей в каждой подобласти. Обратная композиция в каждом методе осуществляется по-разному. Произведено сравнение этих методов между собой и с методом Гаусса. Приведен пример расчета магнитного поля в окне трансформатора на квадратной равномерной сетке с 10000 узлов. Библ. 8.

УДК 621.313.333.004.6.001.6

Диагностирование неисправностей электроэнергетических машин при межфазных замыканиях в обмотке статора. Гашимов М. А., Гусейнов А. М. — «Электричество», 1987, № 4

На основе анализа данных экспериментальных исследований показывается, что межфазное замыкание в обмотке статора асинхронной машины влияет на параметры вибрационных и акустических процессов, и они (в частности, вибрационное ускорение) могут быть рекомендованы в качестве диагностических параметров, с помощью которых можно оценить текущее техническое состояние машины в процессе ее работы. Предлагаются простые инженерные способы для этой цели. Библ. 5.

УДК 621.314.26.001.5

Влияние угла инвертирования непосредственного преобразователя частоты на режим вытеснения вентильной группы. Павлов И. С. Н. — «Электричество», 1987, № 4

Используя математическую зависимость возникновения режима вытеснения одной вентильной группы непосредственного преобразователя частоты от различных параметров системы частотного электропривода, исследовано влияние угла инвертирования преобразователя на этот режим его работы. Библ. 3.

УДК 621.318.124:538.213

Дифференциальные и статические параметры в расчетах нелинейных электромагнитных цепей. Чабан В. И. — «Электричество», 1987, № 4

Получены выражения элементов матриц статических и дифференциальных магнитных проницаемостей нелинейных анизотропных ферромагнитных сред. Установлена взаимосвязь между ними. Показано, что на основе статических параметров анализ проще, круг возможных решаемых задач шире, а точность получаемых результатов выше. Отмечена несостоятельность попыток доказать неоднозначность статических параметров и неправомерность их использования в нелинейных средах. Библ. 5.

УДК 621.318.5.042.001.24

Результаты исследования магнитной проводимости рассеяния плоских магнитопроводов. Зекцер Д. М. — «Электричество», 1987, № 4

Приведены формулы и графики изменения удельных магнитных проводимостей рассеяния плоской Ш-образной магнитной системы, определенные экспериментально методом ЭГДА. Приведены результаты анализа изменения этих проводимостей с целью определения оптимальных конструктивных параметров магнитной системы. Результаты оптимизации подтверждены экспериментально. Библ. 1.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Бертинов А. И., Будзко И. А., Веников В. А., Глебов И. А., Евсеев В. Н. (зам. главного редактора), Ефремов И. С., Иванов-Смоленский А. В., Ильинский Н. Ф., Комельков В. С., Костенко М. В., Лабунов В. А., Ларионов В. П., Лидоренко Н. С., Лизунов С. Д., Мамиконянц Л. Г. (главный редактор), Меерович Э. А., Мучник Г. Ф., Нетушил А. В., Сабинин Ю. А., Слежановский О. В., Сова-лов С. А., Тареев Б. М., Тиходеев Н. Н., Толстов Ю. Г., Федосеев А. М., Шакарян Ю. Г., Шаталов А. С., Шилин Н. В.

Научные редакторы: Б. Д. Макашкин, А. Л. Прилуцкий

Адреса редакции: 103012, Москва, К-12, Б. Черкасский пер., 2/10. Телефон 924-24-80  
101000 Москва, Главный почтамт, абонентный ящик № 648  
Адрес для телеграмм: Москва, 12, Электричество

Технический редактор Н. Н. Хотулёва

Сдано в набор 13.02.87 Подписано в печать 31.03.87 Т-09675 Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Печать высокая Усл. печ. л. 10 Усл. кр.-отт. 10,5 Уч.-изд. л. 14,02  
Тираж 5862 экз.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ордена Трудового Красного Знамени Чеховский полиграфический комбинат ВО «Союзполиграфпром» Государственного комитета СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли, 142300, г. Чехов Московской области