

































































































$$\Delta W_2 = \frac{\sigma_2}{2} L_{п2} [i_{п2}(-0)]^2. \quad (7)$$

В соответствии с принятыми допущениями выражения (6) и (7), как и выражение (5), пригодны для анализа схем секционированных ДЭ. Из этих выражений следует, что для улучшения условий работы ШК в схемах секционированных ДЭ следует по возможности усиливать магнитную связь между секциями, относящимися к различным обмоткам ДЭ.

Используя общепринятое допущение об идеальной магнитной связи между пусковыми и рабочими обмотками и условие равенства магнитных проводимостей при одинаковых воздушных зазорах ДЭ, получим предельные соотношения:

$$\frac{\Delta W_1}{\Delta W_3} = \left[ \frac{w_{п1}w_{р1}}{w_{п3}w_{р3}} \frac{w_{п3} + w_{р3}}{w_{п1} + w_{р1}} \frac{i_{п1}(-0) - i_{р1}(-0)}{i_{п3}(-0) - i_{р3}(-0)} \right]^2; \quad (8)$$

$$\frac{\Delta W_2}{\Delta W_3} = \left[ \frac{w_{п2}(w_{п3} + w_{р3})}{w_{п3}w_{р3}} \frac{i_{п2}(-0)}{i_{п3}(-0) - i_{р3}(-0)} \right]^2. \quad (9)$$

Далее примем для определенности, что ДЭ в сравниваемых схемах имеют одинаковые номинальные значения н. с. мощности и напряжения:

$$\left. \begin{aligned} F_{п} &= \frac{2U(w_{п3} + w_{р3})}{R_{п3} + R_{р3}} = \frac{U(w_{п1} + w_{р1})}{R_{п1} + R_{р1}} = \frac{Uw_{р2}}{R_{р2}}; \\ P_{п} &= \frac{(2U)^2}{R_{п3} + R_{р3}} = \frac{U^2}{R_{п1} + R_{р1}} = \frac{U^2}{R_{р2}}. \end{aligned} \right\} (10)$$

Кроме того, примем допущение равенства установившихся значений н. с. и мощности ДЭ в режиме форсировки. Тогда, как и в [10], можно установить, что принятые равенства обеспечивают эквивалентность ДЭ в сравниваемых схемах по ряду основных показателей (тяговое усилие, быстродействие, тепловые потери в период форсировки, условия работы контактов ВК (рис. 1), отключающих питание ДЭ). Поэтому дальнейшее сравнение схем сводится, в основном, к сравнению условий работы ШК.

Рассмотрим вначале ДЭ без вентиля. Принятые равенства установившихся значений н. с. и мощности ДЭ без вентиля в режиме форсировки имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} F_{\phi} &= U \left( \frac{w_{п3}}{R_{п3}} + \frac{w_{р3}}{R_{р3}} \right) = \frac{Uw_{п1}}{R_{п1}} = U \left( \frac{w_{п2}}{R_{п2}} + \frac{w_{р2}}{R_{р2}} \right); \\ P_{\phi} &= U^2 \left( \frac{1}{R_{п3}} + \frac{1}{R_{р3}} \right) = \frac{U^2}{R_{п1}} = U^2 \left( \frac{1}{R_{п2}} + \frac{1}{R_{р2}} \right). \end{aligned} \right\} (11)$$

При сравнении схем по условиям работы ШК ограничимся рассмотрением двух крайних случаев: 1) замыкание ШК осуществляется в самом начале движения якоря (в момент трогания); 2) замыкание ШК осуществляется после срабатывания ДЭ и достижения токами установившихся значений. Используя известные аналитические выражения для токов ДЭ в переходном режиме с последовательным и параллельным включением [12—15], в соответствии с (10), (11) и рис. 2, б можно показать, что для обоих указанных случаев будут справедливы следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{i_{п1}(-0) - i_{р1}(-0)}{i_{п3}(-0) - i_{р3}(-0)} &= \frac{I_{п1}}{I_{п3} - I_{р3}} = \frac{R_{п3}}{R_{п1}} \frac{R_{р3}}{R_{р3} - R_{п3}}; \\ \frac{i_{п2}(-0)}{i_{п3}(-0) - i_{р3}(-0)} &= \frac{I_{п2}}{I_{п3} - I_{р3}} = \frac{R_{п3}}{R_{п2}} \frac{R_{р3}}{R_{р3} - R_{п3}}. \end{aligned} \right\} (12)$$

Подставляя (12) в (8) и (9) и используя (10) и (11), получим:

$$\frac{\Delta W_1}{\Delta W_2} = \left[ \frac{(1 - k_{w3})(1 + k_{R3}/k_{w3})}{1 + k_{R3}} \right]^2; \quad (13)$$

$$\frac{\Delta W_2}{\Delta W_3} = \left[ \frac{(1 + k_{w3})(1 - k_{R3}/k_{w3})}{1 + k_{R3}} \right]^2. \quad (14)$$

Анализ (13) показывает, что неравенство

$$\Delta W_1/\Delta W_3 < 1 \quad (15)$$

выполняется при достаточном условии:

$$k_{R3} < k_{w3}^2. \quad (16)$$

Используя (10) и (11), можно доказать, что неравенство (16) эквивалентно следующему соотношению между коэффициентом форсировки по мощности и квадратом коэффициента форсировки по н. с.:

$$k_{\phi P} < k_{\phi F}^2. \quad (17)$$

Следовательно, при малых коэффициентах форсировки по мощности, удовлетворяющих (17), последовательная схема выгоднее смешанной по условиям работы ШК.

Анализ правой части (14) показывает, что при относительно больших коэффициентах форсировки по мощности, когда условия (16) или (17) не выполняются, соблюдается неравенство:

$$\Delta W_2/\Delta W_3 < 1. \quad (18)$$

Следовательно, при больших коэффициентах форсировки по мощности параллельная схема по условиям работы ШК выгоднее смешанной.

Согласно [10], при малых коэффициентах форсировки по мощности последовательная схема по условиям работы ШК выгоднее параллельной, а при больших коэффициентах форсировки по мощности параллельная схема выгоднее последовательной по тем же условиям.

Учитывая рекомендации [10] и полученные выше результаты, можно заключить, что при рациональном использовании известных схем ДЭ без вентиля они оказываются более выгодными, чем смешанная схема.

Если же в ДЭ применена смешанная схема, то целесообразна ее замена на одну из известных схем. Возможность такой замены за счет изменения обмоточных данных исходного ДЭ определяется решением системы уравнений (10) и (11).

Сравним теперь последовательную и смешанную схемы ДЭ с вентилями. В последовательной схеме используется один ventиль, а в смешанной — два. Однако согласно (10) номинальные токи вентиля в смешанной схеме в два раза меньше номинального тока вентиля в последовательной схеме. Таким образом, с точки зрения номинального режима последовательная и смешанная схемы практически равноценны.

Для сравниваемых схем было получено:

$$F_{\phi} = \frac{Uw_{п3}}{R_{п3}} = \frac{Uw_{п1}}{R_{п1}}; \quad P_{\phi} = \frac{U^2}{R_{п3}} = \frac{U^2}{R_{п1}}. \quad (19)$$

Кроме того, можно получить соотношение

$$\frac{\Delta W_{1B}}{\Delta W_{3B}} = (1 - k_{w3})^2 < 1, \quad (20)$$

где индекс «в» указывает на наличие вентиля в этих схемах.

Из (20) следует, что при наличии вентиляй последовательная схема выгоднее смешанной по условиям работы ШК. Но, согласно [10], при наличии вентиляй последовательная схема по тем же условиям выгоднее и параллельной. Учитывая изложенное, можно заключить, что для ДЭ с вентилями наиболее выгодна схема с последовательным включением. Если же в спроектированном ДЭ с вентилем применена смешанная схема, то целесообразна ее замена на последовательную.

Для экспериментальной проверки полученных теоретических результатов были получены осциллограммы мощности в ШК при размыкании токов в установившихся и переходных режимах. Использовался магнитопровод с одним сердечником. Секции обмоток были выполнены в виде отдельных катушек с одинаковыми длинами средних витков. Испытания проводились с различными катушками, устанавливаемыми поочередно на одном и том же магнитопроводе. Значения напряжения для сравниваемых схем были одинаковы. Условия работы ШК сравнивались для следующих случаев:

переход от смешанного к параллельному включению без вентиляй;

переход от смешанного к последовательному включению с вентилями.

Для каждого случая данные ДЭ в смешанной схеме принимались за исходные. Данные ДЭ для известных схем были получены по исходным данным и соотношениям, следующим из решения соответствующих систем уравнений (10) и (11) или (10) и (19).

Ниже приведены результаты сравнения опытных и расчетных данных для отношений энергий:

Отношения энергий	Опыт	Расчет
$\Delta W_2 / \Delta W_3$	0,51	0,21
$\Delta W_{1В} / \Delta W_{3В}$	0,91	0,67

Опытные значения отношения энергий определялись по известной методике с использованием результатов обработки осциллограмм мощности в ШК сопоставляемых схем ДЭ [11].

Несмотря на значительные отклонения опытных данных от расчетных, результаты подтверждают справедливость полученных теоретических неравенств (18) и (20). Это указывает на приемлемость принятых допущений при обобщенных аналитических сравнениях схем включения ДЭ.

**Вывод.** При рациональном использовании известных схем с последовательным или параллельным включением они обладают преимуществом перед смешанной схемой по условиям работы ШК. Поэтому при выборе наиболее выгодной схемы включения проектируемого ДЭ следует исключить из рассмотрения смешанную схему и использовать полученные ранее рекомендации по применению последовательной и параллельной схем [10].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по элементам автоматики и телемеханики. Электромагнитные реле/Под ред. Б. С. Сотскова. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958.
2. Справочник по элементам автоматики и телемеханики. Электромагнитные контакторы и магнитные пускатели/ Под ред. Б. С. Сотскова. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959.
3. Нежданов В. Т., Нежданов И. В. Аппараты низкого напряжения. — М.: Изд.-во ЦИТИ электротехнической промышленности и приборостроения, 1961, вып. II.
4. Проектирование электрических аппаратов авиационного электрооборудования/ В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев, А. В. Гордон, А. Н. Ларионов. — М.: Оборонгиз, 1962.
5. Казаков Л. А. Электромагнитные устройства радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Советское радио, 1978.
6. Судовые электроприводы, т. 1/ Справочник. — Л.: Судостроение, 1976.
7. А. с. 559290 (СССР). Электромагнит постоянного тока с форсировкой/Л. Н. Елисеев, Л. И. Евдокимова. Оpubл. в Б. И., 1977, № 19.
8. Нежданов В. Т., Елисеев Л. Н. Электромагниты постоянного тока с форсировкой. — Электротехническая промышленность. Аппараты низкого напряжения, 1978, вып. 5.
9. Устройства управления электромагнитами. ТС—7. Аппараты низкого напряжения. Обзорная информация/Г. В. Могилевский, Б. В. Клименко, Ю. И. Гридин, З. Р. Бронникова — М.: Информэлектро, 1981.
10. Гринберг В. С. Выбор схемы включения двухобмоточного электромагнита. — Электричество, 1982, № 10.
11. Гринберг В. С., Гусельников Э. М., Соленков В. В. Выбор схемы форсировки электромагнита по условиям работы шунтирующих контактов. — Электричество, 1978, № 8.
12. Коц Б. Э. Электромагниты постоянного тока с форсировкой. — М.: Энергия, 1973.
13. Буйлов А. Я. Основы электроаппаратостроения. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1946.
14. Гринберг В. С., Гусельников Э. М., Копоненко Е. В. Время трогания двухобмоточных электромагнитов с параллельным включением обмоток. — Электричество, 1974, № 8.
15. Гринберг В. С., Гусельников Э. М., Копоненко Е. В. Выбор схемы форсировки электромагнита по большой частоте включений. — Электротехника, 1974, № 8.

[21.05.83]



## Учет нагрузки при оптимизации распределения реактивных мощностей

ГУРЕВИЧ Ю. Е., канд. техн. наук, ЛИБОВА Л. Е., канд. техн. наук, ТИМОФЕЕВ В. А., канд. техн. наук

Результаты расчетов оптимизации распределения реактивных мощностей в энергосистеме по минимуму потерь [1, 2] могут существенно зависеть от способа представления нагрузок. Обычно такие расчеты выполняются при допущении  $P_n = \text{const}$ ,  $Q_n = \text{const}$ . Рассмотрение адаптационных процессов в узлах нагрузки [3] подтверждает правомерность этого допущения в отношении активной нагрузки для большинства концентрированных групп потребителей в длительных режимах (с точностью до зависимости к. п. д. электроустановок от напряжения).

Известно, что из-за больших размеров и организационной сложности ЕЭС СССР оптимизационные расчеты не могут быть выполнены для всех сетей одновременно, в рамках одной расчетной схемы, а проводятся порознь для схем каждого уровня иерархии управления (ЦДУ, ОДУ, РЭУ и т. д.).

Если оптимизация распределения реактивных мощностей выполняется, например, для схемы, представленной в расчете сетями 330 кВ и выше, то при моделировании нагрузки следует считаться с двумя обстоятельствами, противоречащими допущению  $P_n = \text{const}$ ,  $Q_n = \text{const}$ . Во-первых, в такой схеме «нагрузку» составляют не только собственно потребители, но и потери активной и реактивной мощности в сетях с напряжением ниже 330 кВ, которые, естественно, зависят от напряжений в расчетной схеме. Следовательно, с ростом этих потерь допущение  $P_n = \text{const}$ ,  $Q_n = \text{const}$  становится менее правомерным. Во-вторых, узлы таких «нагрузок» зачастую связаны между собой по сетям, не вошедшим в расчетную схему. Поэтому эти «нагрузки» определяются не только собственным питающим напряжением, как при известном представлении нагрузок статическими характеристиками, но и напряжениями соседних «нагрузочных» узлов расчетной схемы.

Ниже показано, что правильное описание «нагрузок» в схемах высокого уровня иерархии может быть обеспечено при специальном представлении реактивных «нагрузок» и оптимизации распределения реактивных мощностей, начиная со схем низкого уровня иерархии. Кроме того, в процессе оптимизации режима в схеме высокого уровня полезен косвенный учет изменений потерь активной мощности в схемах более низкого уровня. Все это позволяет приблизиться к минимуму потерь в энергосистеме в целом в большей мере, чем при существующем порядке расчетов от высших уровней иерархии к низшим.

Предлагаемый способ расчетов рассмотрим на примере схемы, показанной на рис. 1, а. Пусть эта схема соответствует двум уровням иерархии управления: верхнему (рис. 1, б) и нижнему (рис. 1, в). Узлами примыкания схем здесь являются шины 110 кВ понижающих трансформаторов 330/110 кВ. В общем случае в качестве узлов примыкания могут рассматриваться любые точки энергосистемы.

Активные мощности во всех схемах, включая потоки активной мощности, проходящие через узлы примыкания, предполагаются известными и соответствующими либо вынужденному их распределению, либо результатам расчетов их оптимизации. Поэтому активные «нагрузки» в схеме I будем считать не зависящими от изменений параметров режима в процессе оптимизации распределения реактивных мощностей<sup>1</sup>. Приближенный учет изменений потерь активной мощности в схемах П', П'' при изменениях напряжений в схеме I будет рассмотрен ниже.

Если при оптимизации распределения реактивных мощностей в схеме I принято допущение  $Q_j = \text{const}$  (рис. 1, б), то значе-

ния напряжений  $U_j$  и коэффициентов трансформации  $k_{Tj}$  влияют на величину потерь активной мощности  $\Delta P_i$  в этой схеме незначительно — только вследствие изменения потерь в  $j$ -м трансформаторе. Поэтому  $\partial \Delta P_i / \partial k_{Tj} \approx 0$ . Реально даже небольшие изменения напряжений  $U_j$  могут приводить к заметному перераспределению реактивных «нагрузок» между соседними узлами примыкания из-за наличия связей между ними по сетям, относящимся к нижнему уровню иерархии (рис. 1, в).

Следовательно, каждую «нагрузку»  $Q_j$  в схеме I нужно характеризовать зависимостью от напряжений  $U_i$  во всех узлах примыкания

$$Q_j = f(U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_n),$$

где  $i \geq j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ . Эти зависимости, которые можно обозначить как  $Q_j(U)$ , должны быть рассчитаны для схем более низкого уровня иерархии. Для этого в схемах П' и П'' узлы примыкания рассматриваются как источники с заданной активной мощностью  $P_j$  и напряжением  $U_j$ .

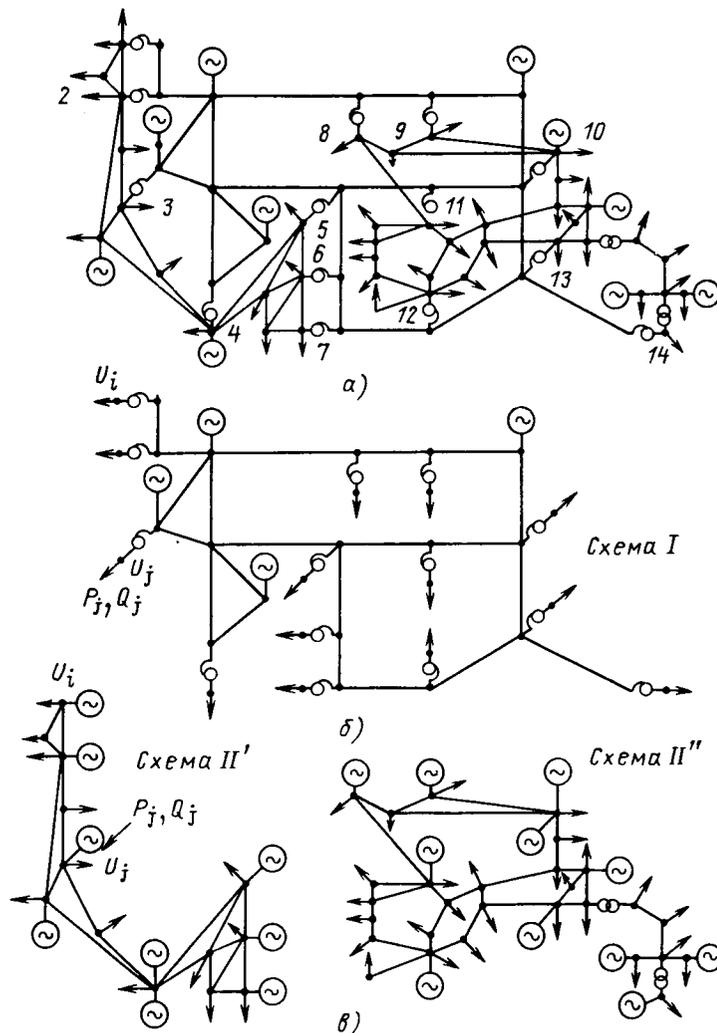


Рис. 1

<sup>1</sup> Если обнаружится необходимость учета поперечного регулирования трансформаторов в узлах примыкания, то может потребоваться дальнейшее развитие и усложнение способов представления нагрузок, поскольку здесь предполагается, что в процессе оптимизации распределения реактивных мощностей напряжения в узлах примыкания изменяются по модулю, а не по фазе.

Характер зависимостей  $Q_j(U)$  показан на рис. 2, где приведены зависимости реактивных мощностей в узлах примыкания схемы П" к схеме I от напряжения в одном из узлов ( $i=11$ )\*. Реактивные нагрузки в схеме П" постоянны,  $Q_H = \text{const}$ . На рис. 2 за единицу приняты значения напряжения  $U_{11}$ , оптимального для схемы П" ( $U_{11\text{опт}}$ ), и соответствующие оптимальному режиму значения  $Q_{j\text{опт}}$ . С ростом  $U_{11}$  реактивная «нагрузка»  $Q_{11}$  увеличивается, а «нагрузки» в близко расположенных узлах примыкания ( $i=8$  и  $12$ ) соответственно уменьшаются. Обращают на себя внимание значительные величины производных  $\partial Q_j/\partial U_i$ , что свидетельствует о существенной роли перераспределения реактивных «нагрузок» схемы I в процессе оптимизации ее режима.

Значения производных  $\partial Q_j/\partial U_i$ , выраженные в относительных единицах, как правило, велики и значительно превышают регулирующие эффекты реактивной нагрузки по напряжению. В то же время при  $j \neq i$  значения этих производных для соседних узлов примыкания обычно отрицательны, а для взаимно удаленных узлов близки к нулю (рис. 1 и 2).

Зависимости  $Q_j(U)$  нелинейны, однако они могут быть линеаризованы в зоне допустимых значений напряжения (рис. 2). Отказ от учета составляющих функций  $Q_j(U)$ , содержащих высшие степени  $U_i$  и парные произведения вида  $U_i U_k$ , представляется допустимым. Тогда зависимости  $Q_j(U)$  в оптимизационных расчетах могут рассматриваться в виде линейных полиномов

$$Q_j = Q_{j0} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial Q_j}{\partial U_i} \right)_0 \cdot (U_i - U_{i0}). \quad (1)$$

Производные  $(\partial Q_j/\partial U_i)_0$  могут быть определены решением системы линейных уравнений, матрица которых представляет собой транспонированную матрицу Якоби, рассчитанную для выбранного режима.

Перераспределение реактивных «нагрузок» в схеме I путем изменения коэффициентов трансформации в узлах примыкания дает возможность дополнительно снижать потери активной мощности в этой схеме по сравнению с обычным способом оптимизации. Расчеты показали, что благодаря такому перераспределению снижение потерь в схеме I составило более чем 10 %.

Таким образом, в рассматриваемой схеме минимум потерь достигается, в частности, соответствующим выбором напряжений  $U_i$  в узлах «нагрузки». Но при этом в схемах более низкого уровня, где напряжения  $U_i$  оказываются питающими, режим может существенно отличаться от оптимального.

Обеспечить минимум суммарных потерь в схемах всех уровней иерархии управления можно в том случае, если в целевую функцию, кроме потерь  $\pi_I$  в рассматриваемой схеме, ввести зависимости потерь в схемах более низкого уровня от напряжений  $U_i$ , т. е. представить минимизируемые потери в виде

$$\pi_i = \pi_I + \sum_l \pi_{IIl}(U), \quad (2)$$

Здесь потери в каждой из  $l$ -х схем более низкого уровня представлены в виде зависимостей от напряжений в узлах примыкания этих схем к схеме I. Таким образом, целесообразно проводить оптимизационные расчеты многоуровневых схем от низших уровней иерархии управления к высшим.

Входящая в (2) функция  $\pi_{IIl}$  может быть с достаточной точностью аппроксимирована разложением в ряд Тейлора с учетом членов второго порядка:

$$\begin{aligned} \pi_{IIl}(U) = & \pi_{IIl0} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial \pi_{IIl}}{\partial U_i} \right)_0 (U_i - U_{i0}) + \\ & + \sum_{i,j=1}^n \left( \frac{\partial^2 \pi_{IIl}}{\partial U_i \partial U_j} \right)_0 (U_i - U_{i0})(U_j - U_{j0}). \end{aligned} \quad (3)$$

\* Расчеты выполнили ст. инж. Н. Б. Владимирова и инж. Г. М. Ивкина.

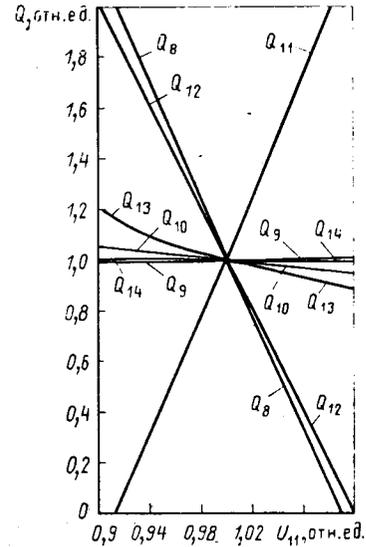


Рис. 2

Коэффициенты  $\left( \frac{\partial \pi_{IIl}}{\partial U_i} \right)_0$  рассчитываются аналогично производным  $\left( \frac{\partial Q_j}{\partial U_i} \right)_0$ . Вычисление коэффициентов  $\left( \frac{\partial \pi_{IIl}}{\partial U_i \partial U_j} \right)_0$  сводится к многократному решению систем линейных алгебраических уравнений с постоянной матрицей коэффициентов аналогично расчету коэффициентов  $\frac{\partial^2 \pi}{\partial P_i \partial P_j}$ , описанному в [1].

При оптимизации в схеме высокого уровня ограничения по напряжениям в схемах более низкого уровня могут быть учтены путем ввода штрафных функций за нарушения этих ограничений. Для этого при расчетах режимов в этих схемах вычисляются значения производных  $\left( \frac{\partial U_s}{\partial U_i} \right)_0$ , где  $U_s$  — напряжения в контролируемых точках. Значения  $U_s$ , соответствующие полученным  $U_i$ , при вычислении штрафных функций в схеме высокого уровня определяются как

$$U_s = U_{s0} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial U_s}{\partial U_i} \right)_0 (U_i - U_{i0}).$$

**Вывод.** Поскольку при оптимизации распределения реактивных мощностей в схемах высших уровней иерархии управления схемы низшего уровня заменяются нагрузочными узлами, для повышения точности оптимизации предлагается:

- реактивную мощность в каждом узле примыкания схем низкого уровня к схеме высокого уровня определять в виде линейной функции напряжений в узлах примыкания и использовать эту функцию при описании соответствующего узла «нагрузки» в схеме высокого уровня;

- дополнить выражения для целевой функции зависимостями потерь активной мощности в схемах более низкого уровня от напряжений в узлах примыкания и вводом штрафных функций за нарушения ограничений по напряжениям в контролируемых точках схем более низкого уровня.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Методы оптимизации режимов энергосистем/В. М. Горнштейн, Б. П. Мирошниченко, А. В. Пономарев и др. — М.: Энергия, 1981.
2. Методика и алгоритм расчета на ЦВМ оптимального режима электрической сети/И. С. Горелик, В. М. Горнштейн, Ю. И. Максимов, В. А. Тимофеев — Тр. ВНИИЭ, 1972, вып. 40.
3. Гуревич Ю. Е., Либова Л. Е. Характеристики нагрузок по напряжению на длительных интервалах времени. — Электричество, 1984, № 7.



При параллельном присоединении ветви  $Z_{Л1}$  к ветви  $(Z_{Л0} - Z_{Л1})/3$  методом наращивания схемы [3] матрица (4) пересчитывается и принимает вид:

$$Z' = \begin{bmatrix} \frac{Z_{Л0} - Z_{Л1}}{3} - \frac{(Z_{Л0} - Z_{Л1})^2}{3(Z_{Л0} + 2Z_{Л1})} & \frac{Z_{М0}Z_{Л1}}{Z_{Л0} + 2Z_{Л1}} \\ \frac{Z_{М0}Z_{Л1}}{Z_{Л0} + 2Z_{Л1}} & \frac{Z_{Л0}'' - Z_{Л1}''}{3} - \frac{Z_{М0}^2}{3(Z_{Л0} + 2Z_{Л1})} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Матрица (5) эквивалентна матрице

$$Z' = \begin{bmatrix} Z_{Л0}' - Z_{Л1}' & \frac{Z_{М0}'}{3} \\ \frac{Z_{М0}'}{3} & \frac{Z_{Л0}''' - Z_{Л1}'''}{3} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Приравнявая (5) и (6), можно найти  $Z_{Л0}'$ , определяемое по выражению (3), а также

$$Z_{М0}' = \frac{3Z_{Л1}Z_{М0}}{Z_{Л0} + 2Z_{Л1}}; \quad (7)$$

$$Z_{Л0}''' = Z_{Л0}'' - \frac{Z_{М0}^2}{Z_{Л0} + 2Z_{Л1}}. \quad (8)$$

Таким образом, получены уточненные значения параметров нулевой последовательности непротяженной линии при отключении и заземлении одной из ее фаз. При этом наиболее просто оценивается влияние заземления по концам отключенной фазы на изменение электрических величин в неполнофазном режиме, например, на снижение токов обратной последовательности за счет увеличения нулевой. Некоторое увеличение токов нулевой последовательности в примыкающих к неполнофазной линии системах сопровождается снижением влияния на линии связи за счет экранирующего эффекта заземленной фазы, который определяется как отношение тока в заземленном проводе к полному току нулевой последовательности. Так, из рис. 3, а получаем:

$$\frac{3I_{Л0}}{3I_0} = \frac{Z_{Л0} - Z_{Л1}}{Z_{Л0} + 2Z_{Л1}}.$$

Такой же подход можно предложить и к рассмотрению протяженной и симметричной по фазам линии. Отключение и заземление по концам одной из фаз линии с емкостной проводимостью представлено на рис. 4, а заземлением по концам троса, имеющего те же параметры, что и фаза линии. После свертывания участка схемы, расположенного между узлами  $MNOL$

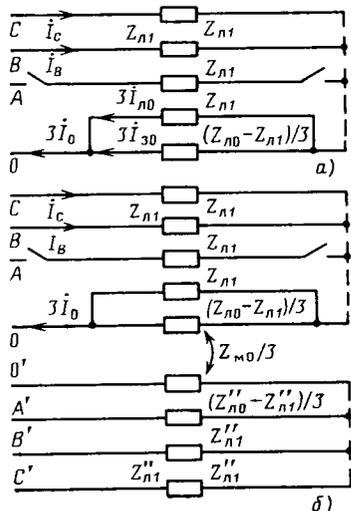


Рис. 3. Схемы для определения сопротивлений нулевой последовательности одиночной (а) и параллельных (б) непротяженных линий с отключением и заземлением по концам фазы на одной из них

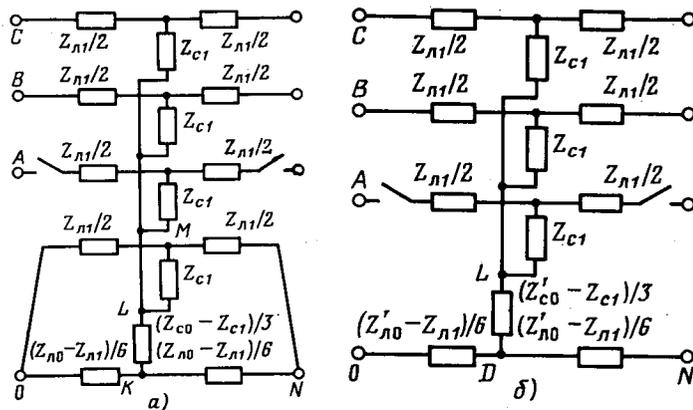


Рис. 4. Схемы для определения сопротивлений нулевой последовательности линии с учетом емкостной проводимости

рис. 4, а в участок  $OLND$  на рис. 4, б аналогично выражению (2) определяются сопротивления нулевой последовательности линии. Так, из равенств для схемы рис. 4, б:

$$\frac{Z_{Л0}' - Z_{Л1}'}{6} = Z_{OD} = Z_{DN}; \quad \frac{Z_{C0}' - Z_{C1}'}{3} = Z_{LD} \quad (9)$$

соответственно определяются

$$\frac{Z_{Л0}'}{2} = 3Z_{OD} + \frac{Z_{Л1}'}{2}; \quad Z_{C0}' = 3Z_{LD} + Z_{C1}'. \quad (10)$$

Например, для численных параметров протяженной линии на схеме рис. 4, а сопротивления нулевой последовательности до отключения и заземления одной из фаз равны:

$$\frac{Z_{Л1}}{2} = j 52, 25; \quad \frac{Z_{Л0}}{2} = -j 142, 25; \quad Z_{C0} = -j 1220; \quad Z_{C1} = -j 800.$$

После преобразования участка  $MNOL$  схемы рис. 4, а в участок  $OLN$  схемы рис. 4, б было получено

$$Z_{OD} = Z_{DN} = j 19, 3; \quad Z_{LD} = -j 117, 2.$$

Новые параметры нулевой последовательности определяются по (9) и (10):

$$\frac{Z_{Л0}'}{2} = 3j 19, 3 + j 52, 25 = j 110, 15; \\ Z_{C0}' = 3(-j 117, 2) - j 800 = -j 1151, 6.$$

После этого для расчета передачи по протяженной линии может быть использован как метод комплексных схем замещения, так и другие методы [3]. Рассмотренные способы определения параметров нулевой последовательности линий при заземлении по концам отключенной фазы могут быть использованы и при расчетах на ЦВМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эбнн Л. Е. Сети с использованием земли в качестве провода. — Электрические станции, 1939, № 8.
2. Розенберг Б. И. Комплексные схемы замещения трехфазных сетей при некоторых видах асимметрии. — Электричество, 1957, № 1.
3. Чернин А. Б. Вычисление электрических величин и поведение релейной защиты при неполнофазных режимах в электрических системах. — М.: ГЭИ, 1963.
4. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. — М.: Энергия, 1964.
5. Вавилов И. В., Рудакова Р. М. Расчет токов плавки гололеда по схеме два провода — земля. — Электрические станции, 1979, № 12.
6. А. с. 649078 (СССР). Устройство для плавки гололеда постоянным током/В. В. Бургсдорф, Г. А. Генрих, Л. А. Никоненко и др. Оpubл. в Б. И., 1979, № 7.

# Трехфазные трансформаторы с пространственным сердечником и разнесенными обмотками

КОЗЛОВ М. И., канд. техн. наук, ГЕРШЕНКРОЙ В. Л., канд. техн. наук,

ГОРДИЕНКО Н. И., инж., ГОШУРЕНКО В. И., инж.

В трехфазном трансформаторе высоковольтного выпрямителя расположение обмоток на стержнях пространственно-симметричного сердечника одна в другой приводит к увеличению диаметра котла [1, 2]. Это ограничивает величину давления газа и увеличивает толщину стенки котла. С целью определения возможности уменьшения диаметра котла были проведены эксперименты по полному или частичному переносу обмоток низкого напряжения (НН) со стержней на ярма, соединенные треугольником.

В трансформаторе с полным переносом обмоток НН со стержней на ярма магнитные потоки в стержнях в  $\sqrt{3}$  раз больше потоков в ярмах.

Используя это соотношение, можно получить для коэффициента трансформации  $K$  этого трансформатора выражение

$$K = \frac{I_1}{I_2} = \frac{E_2}{E_1} = W_2 \sqrt{3} / W_1, \quad (1)$$

откуда следует (без учета потерь):

$$K = \sqrt{3}, \quad E_2 = \sqrt{3}E_1, \quad I_1 = \sqrt{3}I_2 \quad (\text{при } W_1 = W_2);$$

$$K = 1, \quad E_2 = E_1, \quad I_1 = I_2 \quad (\text{при } W_1 = \sqrt{3}W_2),$$

т. е. при полном переносе обмоток НН со стержней на ярма при том же входном напряжении выходное напряжение увеличивается в  $\sqrt{3}$  раз. Это позволяет уменьшить витки  $W_2$  в  $\sqrt{3}$  раз.

При этом сечение провода НН необходимо увеличить в  $\sqrt{3}$  раз. При переносе части обмоток НН со стержней на ярма (комбинированный трансформатор) потоки в ярмах и стержнях состоят из двух частей. Так, поток в ярме

$$\Phi_{я} = \Phi'_{я} + \Phi''_{я}, \quad (2)$$

где  $\Phi'_{я}$  — часть потока ярма, создаваемая частью обмотки НН ( $W_{1я}$ ), расположенной на ярме;  $\Phi''_{я}$  — часть потока ярма, создаваемая частью обмотки НН ( $W_{1с}$ ), расположенной на стержне. Аналогично поток в стержне

$$\Phi_c = \Phi'_c + \Phi''_c, \quad (3)$$

где  $\Phi'_c$  — часть потока стержня, создаваемая частью обмотки НН расположенной на ярме;  $\Phi''_c$  — часть потока стержня, создаваемая частью обмотки НН, расположенной на стержне.

Отсюда э. д. с.  $E_1$  обмотки НН равна

$$E_1 = 4,44f (W_{1я}\Phi_{яm} + W_{1с}\Phi_{cm}), \quad (4)$$

а э. д. с.  $E_2$  обмоток высокого напряжения (ВН) —

$$E_2 = 4,44f W_2 \Phi_{cm}, \quad (5)$$

где индекс  $m$  означает максимальное значение.

Так как  $\Phi_c = \sqrt{3}\Phi_{я}$ , то без учета потерь

$$K = E_2/E_1 = I_1/I_2 = \sqrt{3}W_2/W_{1я} + \sqrt{3}W_{1с}. \quad (6)$$

Для проверки этих соотношений на универсальном трансформаторе исследовано несколько вариантов размещения обмоток НН. Стержни трансформатора имеют размер  $40 \times 40 \times 350$  мм, ярма —  $20 \times 50 \times 220$  мм. Частота питающей сети  $f = 50$  Гц. В таблице приведены характеристики обмоток исследованных трансформаторов.

В трансформаторах Т-5, Т-6, Т-8 все части обмоток НН соединены последовательно.

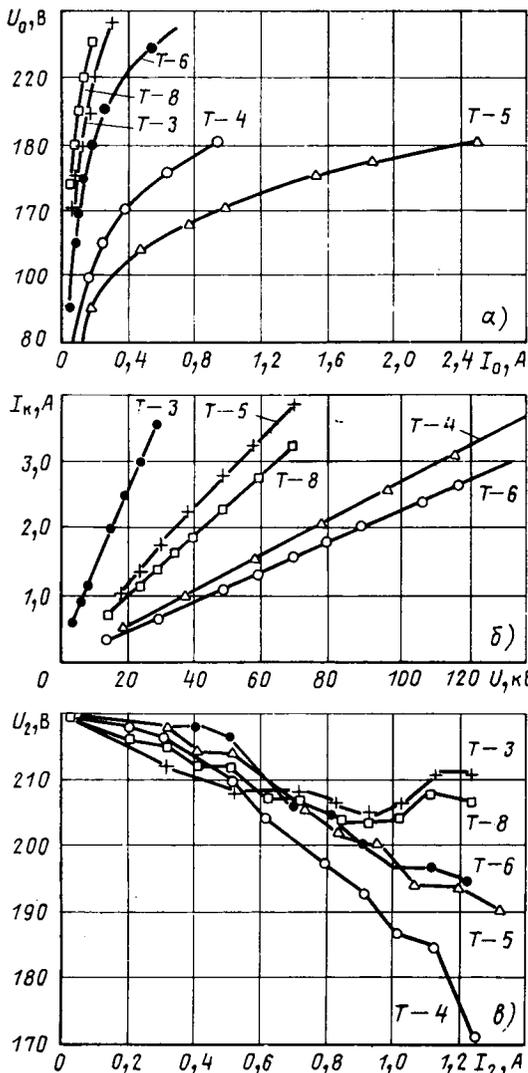


Рис. 1

Трансформатор	Число витков, марка и диаметр провода				$E_2/E_1$
	Обмотки НН			Обмотки ВН	
	на стержнях	на верхних ярмах	на нижних ярмах		
Т-3	620 ПЭЛ-0,85			620 ПЭЛ-0,85	1
Т-4		620 ПЭЛ-1,16		620 ПЭЛ-0,85	$\sqrt{3}$
Т-5		310 ПЭЛ-1,16	310 ПЭЛ-1,16	620 ПЭЛ-0,85	$\sqrt{3}$
Т-6		620 ПЭЛ-1,16	310 ПЭЛ-1,16	620 ПЭЛ-0,85	1,15
Т-8	354 ПЭЛ-0,85	310 ПЭЛ-1,16	354 ПЭЛ-1,16	620 ПЭЛ-0,85	0,728

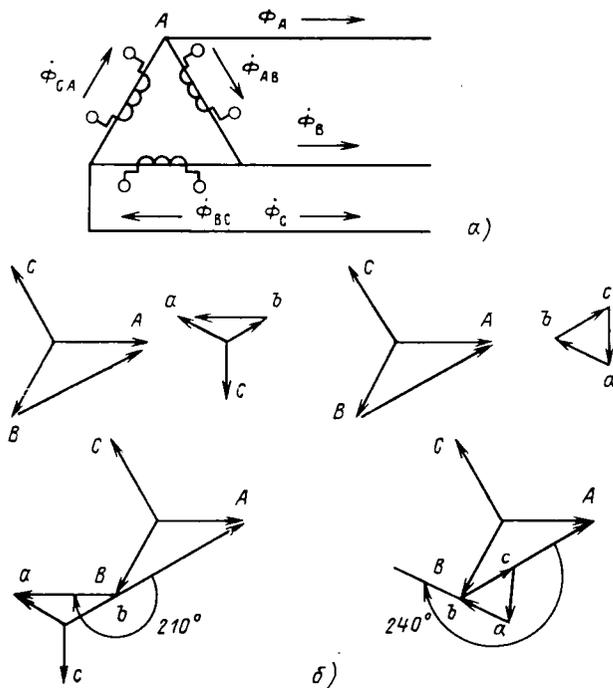


Рис. 2

На рис. 1 приведены характеристики холостого хода (а), короткого замыкания (б) и внешние характеристики (в). Эксперименты показали, что Т-4 имеет наилучшую внешнюю характеристику. Меньшее рассеяние имеют Т-5 и Т-6. Более предпочтительным является Т-8. Несмотря на то, что значительная часть обмоток НН (2/3 от числа витков) размещена на ярмах, внешняя характеристика Т-8 практически равноценна с характеристикой Т-3.

Из (1) и (6) следует, что при полном или частичном переносе можно уменьшить число витков обмоток ВН, что существенно для высоковольтных трансформаторов с выходным напряжением в сотни киловольт, когда число витков обмоток ВН исчисляется десятками тысяч, а сечение окна сердечника, занимаемое обмоткой ВН значительно превышает сечение окна, занимаемое обмоткой НН, не только из-за необходимых изоляционных расстояний, но и в значительной степени за счет роста суммарного сечения изоляции провода обмотки ВН, которое во много раз превышает суммарное сечение провода. Поэтому даже незначительное снижение числа витков позволяет эффективно уменьшать габариты обмоток ВН. При полном или частичном переносе обмоток НН уменьшение габаритов обмоток ВН можно осуществлять путем приближения вторичных обмоток к стержню, либо путем увеличения сечения стержня до размеров, ранее занимаемых обмоткой НН, либо комбинированным путем.

Трансформатор с обмотками на стержнях имеет 4 основные группы соединений обмоток (0, 6, 11, 5) [3]. Определим основные группы соединений трансформатора с полностью разнесенными обмотками.

а) Соединение  $\Delta/\Delta$ .

Пусть обмотка НН, связанная с фазой А сети, расположена на ярме АВ (рис. 2, а), обмотка НН, связанная с фазой В сети, расположена на ярме ВС и т. д. Соответственно обмотка ВН, связанная с фазой а нагрузки, расположена на стержне А и т. д. Пусть также

$$\dot{U}_A = U_A, \dot{U}_B = U_A \angle -120^\circ, \dot{U}_C = U_A \angle 120^\circ, \text{ тогда линейные}$$

напряжения

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = U_{AB} \angle 30^\circ; \dot{U}_{BC} = U_{AB} \angle -90^\circ; \dot{U}_{CA} = U_{AB} \angle -120^\circ.$$

Если пренебречь потерями, поток в каждом ярме будет отставать от напряжения на угол  $90^\circ$ :

$$\dot{\Phi}_{AB} = \dot{\Phi}_{AB} \angle -90^\circ; \dot{\Phi}_{BC} = \dot{\Phi}_{AB} \angle -210^\circ; \dot{\Phi}_{CA} = \dot{\Phi}_{AB} \angle 30^\circ.$$

Линейные потоки

$$\dot{\Phi}_A = \dot{\Phi}_{CA} - \dot{\Phi}_{AB} = 1,73\dot{\Phi}_{AB} \angle 60^\circ; \dot{\Phi}_B = 1,73\dot{\Phi}_{AB} \angle -60^\circ; \dot{\Phi}_C = -1,73\dot{\Phi}_{AB}.$$

Фазные напряжения на нагрузке  $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$  опережают свои потоки на угол  $90^\circ$ :

$$\dot{U}_a = U_a \angle 150^\circ; \dot{U}_b = U_a \angle 30^\circ; \dot{U}_c = U_a \angle -90^\circ.$$

Тогда линейные напряжения на нагрузке

$$\dot{U}_{ab} = -U_{ab}; \dot{U}_{bc} = U_{ab} \angle 60^\circ; \dot{U}_{ca} = U_{ab} \angle -60^\circ.$$

Сдвиг фаз между линейными векторами для обмоток ВН и НН показан на векторных диаграммах рис. 2, б слева и соответствует группе 7. Если на стороне ВН в нулевой точке соединить зажимы а, b, c, а нагрузку подключить к зажимам x, y, z, то трансформатор будет относиться к группе 1.

б) Соединение  $\Delta/\Delta$ .

Здесь линейные напряжения равны фазным:

$$\dot{U}_{ab} = U_a \angle 150^\circ; \dot{U}_{bc} = U_a \angle 30^\circ; \dot{U}_{ca} = U_a \angle -90^\circ.$$

Сдвиг фаз между линейными векторами для обмоток ВН и НН показан на векторных диаграммах рис. 2, б справа и соответствует группе 8.

Если поменять местами начала и концы обмоток ВН, то трансформатор будет относиться к группе 2. Таким образом, трансформатор с обмотками НН, расположенными на ярмах, соединенных треугольником, и обмотками ВН, расположенными на стержнях, имеет следующие основные группы соединения — 1, 7, 2, 8. В комбинированном трансформаторе можно получить промежуточные группы соединения. На рис. 3 представлена векторная диаграмма трансформатора с разнесенными обмотками при работе на активно-индуктивную нагрузку.

Построение векторной диаграммы трансформатора с неразнесенными обмотками проводится для одной фазы. В трансформаторе с разнесенными обмотками из-за наличия двух видов потоков построение векторной диаграммы для одной фазы без преобразования магнитных цепей из соединения треугольником в соединение звездой не представляется возможным. Для упрощения можно строить диаграммы токов и напряжений отдельно для одной первичной и одной вторичной обмоток.

Диаграмма на рис. 3 построена по уравнениям:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}'_1 + \dot{i}_1 R_1 + \dot{i}_1 j\omega L_1;$$

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{i}_2 R_2 + \dot{i}_2 j\omega L_2,$$

где  $\dot{U}_1$  — фазное напряжение первичной обмотки;  $\dot{U}'_1$  — напряжение, уравновешивающее э. д. с.  $E_1$ , наводимую потоком ярма;  $\dot{i}_1 R_1$  и  $\dot{i}_1 j\omega L_1$  — соответственно активные и реактивные потери напряжения в первичной обмотке;  $E_2$  — э. д. с., наводимая во вторичной обмотке потоком стержня;  $\dot{U}_2$  — напряжение на нагрузке;  $\dot{i}_2 R_2$  и  $\dot{i}_2 j\omega L_2$  — соответственно активные и реактивные потери напряжения во вторичной обмотке.

Эксперименты показали, что в трансформаторах с разнесенными обмотками напряжение короткого замыкания можно изменять в широких пределах, и такие трансформаторы могут найти широкое применение в системах тиристорных преобразователей, дуговых электропечей и высоковольтных выпрямителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 500719 (СССР). Ускоритель электронов/Е. А. Абрамян, Ф. И. Гражис, А. А. Курков и др. Оpubл. в Б. И., 1976, № 39.
2. А. с. 546128 (СССР). Высоковольтный генератор-выпрямитель/Абрамян Е. А., Курков А. А., Привезенцев В. Г. Оpubл. в Б. И., 1977, № 5.
3. Кацман М. М. Электрические машины и трансформаторы. — М.: Высшая школа, 1976.

# Восстановление электрической прочности грозоразрядных промежутков с подвижными электродами после прохождения больших импульсных токов

ПАВЛОВ В. А., ПИЧУГИН Ю. П., РОМАНЕНКО И. Н.

Чебоксары

Патребности получения высоковольтных импульсов с большой частотой следования привели к интенсивным разработкам коммутаторов, на базе которых могут быть созданы генераторы таких импульсов, в нескольких направлениях. Основными из этих направлений являются управляемый разряд в газах [1—5]; разряд в вакууме [1, 6]; электронно-лучевые вентили [7, 8]; полупроводниковые приборы [9, 10].

Преимущества того или иного типа коммутатора определяются рядом параметров: максимальное рабочее напряжение; максимальный коммутируемый ток; фактор мощности; время коммутации; стабильность срабатывания; собственная индуктивность; удельный вес на единицу средней коммутируемой мощности; допустимая частота срабатываний, определяемая скоростью восстановления электрической прочности (ВЭП); ресурс и т. д.

Предварительная оценка этих параметров показывает, что одним из наиболее перспективных коммутаторов является газонаполненный разрядник с перемещающимися с большой скоростью относительно друг друга электродами, так называемый «вращающийся разрядник» [11—15].

Так как частотные свойства коммутатора определяются скоростью ВЭП, то целью настоящей работы явилось изучение скорости ВЭП вращающегося разрядника при различных условиях для оценки перспективности использования таких разрядников в генераторах высоковольтных импульсов.

Исследуемый разрядник (рис. 1) содержит корпус 1 с отверстиями, внутри которого установлены две неподвижные токопроводящие пластины 2 и 3 основными электродами 4 и 5, образующие основной разрядный промежуток, и аксиально расположенные между ними чередующиеся вращающиеся диэлектрические диски 6 и 7 с вспомогательными электродами 8 и 9 и неподвижная диэлектрическая пластина 10 с вспомогательным электродом 11, расположенным напротив основных электродов, и вентиляционными лопатками 12. Диски 6 и 7 жестко закреплены на валу вращения 13, соединенном с электродвигателем 14.

Перемещение электродов 8 и 9 при вращении дисков 6 и 7 обеспечивает быстрое увеличение длины разрядного промежутка

после разряда, осуществляемого в момент наименьшего расстояния между подвижными и неподвижными электродами. Создаваемый вентиляционными лопатками газовый поток направлен на электроды и создает поперечное по отношению к каналу разряда дутье со скоростью потока, равной (0,5—0,7) от наибольшей линейной скорости перемещения подвижных электродов 8 и 9.

Очевидно, что описанный разрядник обладает рядом преимуществ по сравнению с известными коммутаторами:

1. На его основе можно создать многоазорный разрядник на высокие напряжения, увеличивая число вращающихся дисков и неподвижных диэлектрических пластин.

2. Ожидаемая наибольшая частота коммутации достаточно велика — свыше 1 кГц.

3. Не требуются специальные системы охлаждения и обдува.

Измерение скорости ВЭП осуществлялось по разработанной авторами схеме, показанной на рис. 1, которая позволяет исследовать ВЭП методом свободного восстановления, когда через исследуемый промежуток пропускается импульс тока определенной величины и формы и через заданный отрезок времени к этому же промежутку прикладывается зондирующий импульс напряжения. Кривые ВЭП строятся по измеренным значениям пробивного напряжения и времени между импульсами.

Установка состоит из вращающегося разрядника (ВР), накопительного конденсатора (батареи конденсаторов)  $C1$ , генератора импульсных напряжений (ГИН), блока задержки (БЗ) и системы измерений. Конденсатор  $C1$  разряжается через первичную обмотку импульсного трансформатора ИТ1, малоиндуктивный шунт  $R4$ , регулируемый резистор  $R1$  и искровой промежуток между основными электродами 4 и 5. Шунт позволяет регистрировать ток на осциллографе. Резистор  $R1$  предназначен для регулировки формы импульса разрядного тока. Напряжение со вторичной обмотки ИТ1 поступает на запуск разрядника  $P1$  блока задержки. При срабатывании этого разрядника электрическая цепь между предварительно заряженным конденсатором  $C3$  и незаряженным конденсатором  $C4$  замыкается и последний от конденсатора  $C3$  ( $C3 \gg C4$ ) заряжается через регулируемый резистор  $R3$  до заданного напряжения. При достижении на конденсаторе  $C4$  напряжения, равного напряжению пробоя разрядника  $P2$ , конденсатор  $C4$  разряжается через первичную обмотку ИТ2, напряжение со вторичной обмотки которого подается на запуск ГИН, формирующего зондирующие импульсы напряжения. Изменением сопротивления резистора  $R3$  и длины промежутка между электродами разрядника  $P2$  регулируется время задержки зондирующего импульса от начала протекания тока в разряднике в пределах 0,01—20 мс.

Для формирования зондирующих импульсов использовался малоиндуктивный ГИН с расширенной зоной устойчивого срабатывания [16, 17]. Амплитуда импульса ГИН без перенастройки изменялась от 40 до 100 кВ при длительности фронта на холостом ходу 6—12 нс. Для регулировки длительности фронта зондирующего импульса использовались конденсатор  $C2$  и регулируемый резистор  $R2$ , включенные на выходе ГИН. Зондирующий импульс подавался на половину разрядного промежутка. Если бы он подавался на весь промежуток между электродами 4 и 5, то этот промежуток в проводящем состоянии шунтировал бы выходной сигнал генератора и данные измерений были бы искаженными. Делитель напряжения из резисторов  $R5$  и  $R6$  предназначен для регистрации зондирующего импульса.

По осциллограммам разрядного тока и зондирующего импульса (рис. 2) определялась величина 90 %-ного пробивного напряжения разрядного промежутка по истечении заданного времени от начала разряда. Предварительные измерения показали, что среднеквадратичная погрешность не превышает 7—8 % при числе измерений 20—25 для каждого случая. Поэтому все зависимости ВЭП строились по точкам, каждая из которых определялась как среднearифметическое значение при обработке 20—25 осциллограмм.

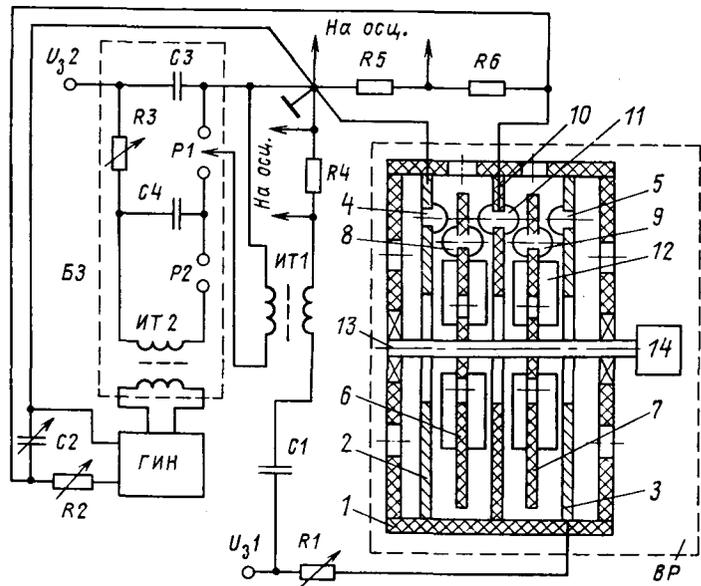


Рис. 1. Упрощенное изображение конструкции разрядника и принципиальная схема экспериментальной установки: ВР — вращающийся разрядник; БЗ — блок задержки; ГИН — генератор зондирующих импульсов напряжения

Параметры разряда и разрядника менялись в следующих пределах: напряжение накопителя —  $30 \div 50$  кВ; разрядный ток — затухающие колебания с частотой 200—350 кГц при наибольшей амплитуде 30 кА; коммутируемая энергия импульса —  $12 \div 100$  Дж, скорость вращения дисков  $n = 16,6 \div 60$  об/с; линейная скорость перемещения электродов —  $12,5 \div 45,5$  м/с; минимальное расстояние между двумя электродами — 2 мм; электроды — полусферические с диаметром полусферы 2 см из бронзы.

Типичные кривые ВЭП, полученные при длительности фронта зондирующего импульса 2 мкс, показаны на рис. 3 и 4.

Полученные кривые показывают принципиальное отличие процессов ВЭП в случае перемещающихся электродов по сравнению с ВЭП при неподвижных электродах. Это видно из сравнения кривых 1, 2, 3 (подвижные электроды) на рис. 3 с кривой 4, снятой для неподвижных электродов. Для подвижных электродов скорость ВЭП значительно больше и с течением времени нарастает. Отсутствует длительный пологий участок кривых ВЭП, характерный для неподвижных электродов.

С увеличением скорости вращения дисков скорость ВЭП возрастает и при  $n=60$  об/с (линейная скорость перемещения электродов 45,5 м/с) полное ВЭП достигается за 1 мс. Очевидно, что вполне реально увеличить линейную скорость до 100—150 м/с (ограничением является механическая прочность диска) и достичь полного ВЭП за 300—500 мкс при коммутируемой энергии порядка 100 Дж, т. е. в разрядниках такого типа частота коммутации может составить 2—3 кГц без применения специальных мер.

Как видно из рис. 3 и 4, большое значение имеет обдув исследуемого промежутка с помощью вентиляционных лопаток, установленных на вращающихся дисках, причем относительная эффективность обдува тем больше, чем выше скорость вращения. Так, при  $n=16,6$  об/с за счет обдува время ВЭП снижается всего на 10 %, а при  $n=60$  об/с — на 25 %. Кроме этого, если рассматривать зависимость средних пробивных напряженностей поля  $E_{пр}$  от времени (рис. 4), то видно, что  $E_{пр}$  с увеличением скорости снижается, если нет обдува, и увеличивается при дутье. Для анализа этого явления на рис. 5 показаны зависимости  $E_{пр}$  от скорости  $v$  потока газа через разрядный промежуток. Скорость  $v$  определялась по известным соотношениям теории вентиляторов из скорости вращения [18].

Из этих кривых видно, что если нет вентиляции, то  $E_{пр}$  снижается с увеличением скорости, причем для малых времени (меньше 1 мс) это снижение выражено тем заметнее, чем больше энергии прошло после окончания разряда. Это может объясняться следующим образом: с увеличением скорости для одного момента времени расстояние между электродами больше, и сильнее сказывается степень неоднородности поля. В нашем случае  $E_{пр}$  для неподвижных электродов (без предшествующего разряда) снижается от 26 кВ/см (при минимальном расстоянии 2 мм) до 17 кВ/см (при расстоянии 20 мм). Именно эти расстояния характерны для момента  $t=0,6$  мс при рассматриваемых скоростях вращения. Кроме того, при этих временах плазма еще имеет достаточно высокую температуру и степень ионизации [19], что способствует выравниванию поля в промежутке. Для времени 1,3 мс расстояния значительно больше, плазма практически деионизована и степень неоднородности поля выше.

При обдуве послеразрядная плазма выходит из промежутка со скоростью потока, образуя зоны холодного газа вблизи электродов. Скорость деионизации плазмы также возрастает. Чем выше скорость обдува, тем интенсивнее эти процессы, преобладающие в рассматриваемом разряднике над снижением  $E_{пр}$  за счет роста степени неоднородности поля при увеличении расстояния. Как видно из рис. 5, чем больше проходит времени после разряда, тем меньше влияние ионизованных продуктов распада дуги.

Следует однако отметить, что изложенное объяснение носит в значительной мере характер гипотезы, так как требуются дополнительные исследования процессов поведения плазменных образований в послеразрядных стадиях.

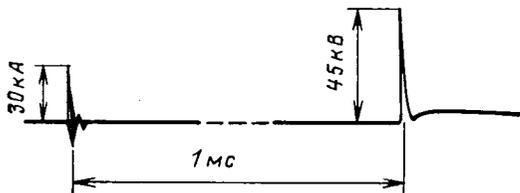


Рис. 2. Комбинированная осциллограмма разрядного тока и зондирующего импульса

Как и следовало ожидать по данным исследований ВЭП при неподвижных электродах, увеличение амплитуды тока и в случае перемещающихся электродов не приводит к значительному увеличению времени ВЭП.

**Выводы.** 1. Перемещением электродов удается избежать стадии медленного ВЭП, связанной с охлаждением рабочей поверхности электродов.

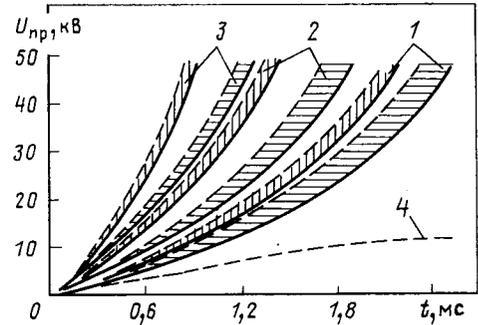


Рис. 3. Кривые ВЭП: 1, 2, 3 —  $n=16,6; 33,3; 60$  об/с соответственно. Сплошной линией показаны кривые ВЭП с максимумом тока разряда 30 кА, пунктирной линией — 6,5 кА. Горизонтальная штриховка — зона ВЭП без продува разрядного промежутка, вертикальная штриховка — с продувом при помощи вентиляционных лопаток. Кривая 4 — ВЭП при неподвижных электродах (расстояние между электродами 2 мм, максимум тока 30 кА).

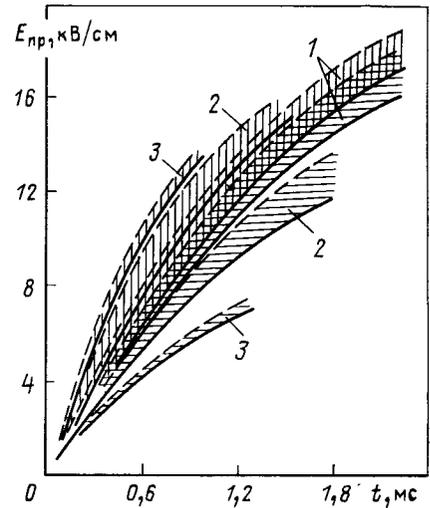


Рис. 4. Зависимости средних пробивных градиентов потенциала в послеразрядном промежутке ВР (построены по данным рис. 3) Обозначения аналогичны рис. 3.

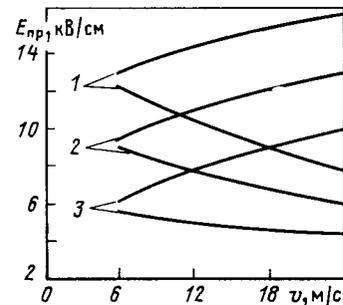


Рис. 5. Зависимости  $E_{пр}$  от скорости потока газа (воздуха) через разрядный промежуток при различных значениях времени 1 — при  $t=1,3$  мс; 2 — при  $t=0,9$  мс; 3 — при  $t=0,6$  мс. Возрастающие зависимости — при вентиляции разрядного промежутка, убывающие — без вентиляции

2. Использование принудительного обдува послеразрядного промежутка с помощью вентиляционных лопаток тем эффективнее, чем больше скорость вращения дисков; время ВЭП может быть снижено на 50—100 %.

3. При коммутируемой энергии порядка сотен джоулей и характерном времени протекания тока, равном десяткам микросекунд могут быть достигнуты значения частоты коммутации до 3 кГц. Значение фактора мощности для данного типа разрядников может достигать  $(1 \div 2) \cdot 10^{13}$  В·А·Гц, что недостижимо в коммутаторах известных типов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техника больших импульсных токов и магнитных полей/П. Н. Дашук, С. Л. Зайнец, В. С. Комельков и др. — М.: Атомиздат, 1970.
2. Месяц Г. А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. — М.: Советское радио, 1974.
3. Ковальчук Б. М., Кремнев В. В., Поталицын Ю. Ф. Сильноточные наносекундные коммутаторы. — Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1979.
4. Киселев Ю. В., Черепанов В. П. Искровые разрядники. — М.: Советское радио, 1976.
5. Импульсные системы большой мощности Пер. с англ. Сб. статей. — М.: Мир, 1981.
6. Воздвиженский А. В., Сидоров В. А., Богомолов В. А. Вакуумный управляемый коммутатор (разрядник). — ПТЭ, 1983, № 3.
7. Переводчиков В. И. Электронно-лучевые вентили. — Электротехника, 1980, № 6.
8. Переводчиков В. И., Зеленов В. Е., Липатов В. С., Холмский И. Г. Перспективы применения электронно-лучевых вентилях. — Электротехника, 1980, № 6.
9. Nilsson A., Eklund L., Högborg K. Design and testing

of an HVDC thyristor valve. — Int. Conf. Thyristor and variable Static Equip. ac and dc Transmiss. London, 30 Nov. — 3 Dec., 1981. — London, New York, 1981, p. 154—157.

10. Eklund L., Weimers L. Three generations in twenty years—forty times higher power rating. — ASEA journal, 1983, v. 56, N 2, p. 8—11.

11. Детали и элементы радиолакационных станций./Пер. с англ. — М.: Советское радио, 1952, т. 1.

12. А. с. 714550 (СССР). Вращающийся разрядник/И. Н. Романенко, Ю. П. Пичугин, В. А. Павлов. Оpubл. в Б. И. 1980, № 5.

13. А. с. 811379 (СССР). Вращающийся разрядник/В. А. Павлов, Ю. П. Пичугин, И. Н. Романенко. Оpubл. в Б. И., 1981, № 9.

14. А. с. 828284 (СССР). Вращающийся разрядник/В. А. Павлов, Ю. П. Пичугин, И. Н. Романенко. Оpubл. в Б. И., 1981, № 17.

15. Павлов В. А., Пичугин Ю. П., Романенко И. Н. Вращающийся разрядник. — ПТЭ, 1980, № 6.

16. А. с. 760417 (СССР). Высоковольтный генератор импульсных напряжений/А. П. Комаров, В. А. Павлов, Ю. П. Пичугин, И. Н. Романенко. Оpubл. в Б. И., 1980, № 32.

17. Малоиндуктивные генераторы высоковольтных импульсов наносекундного диапазона с расширенной зоной устойчивого срабатывания/А. П. Комаров, Ю. П. Пичугин, В. А. Павлов, И. Н. Романенко. — В кн.: Высоковольтная импульсная техника. Чебоксары: ЧГУ, 1980.

18. Косточкин В. Н. Центробежные вентиляторы (основы теории и расчета). — М.: Машгиз, 1951.

19. Бельков Е. П. Восстановление электрической прочности искровых промежутков после протекания больших импульсов тока. — ЖТФ, 1974, т. 44, № 9.

[02.09.85]



УДК 621.315.62.317.7.082.6

## Применение тепловизионного метода для диагностики состояния изоляции высоковольтных конструкций

ГЕФЛЕ О. С.

*НИИ высоких напряжений при Томском политехническом институте*

Внезапный отказ высоковольтных конструкций, обусловленный пробоем изоляции, приводит к аварийному простоем оборудования и значительным экономическим потерям. Известные методы контроля состояния изоляции, основанные на измерении тангенса угла диэлектрических потерь, сопротивления изоляции и т. д., не позволяют обнаруживать в объеме изоляции локальных очагов разрушения, предшествующих ее пробоем. Методы тепловой и ультразвуковой дефектоскопии [1—3] не позволяют осуществлять контроль изделий под напряжением (рабочим или испытательным). Кроме того, чувствительность пассивных методов теплового контроля, основанных на нагреве изделий источниками тепла и регистрации разности температур на их поверхности, сильно зависит от соотношения поперечных размеров дефекта и глубины его залегания. При таком контроле возможно выявление только поверхностных и подповерхностных дефектов с величиной раскрытия, большей двух глубин залегания [4]. Поэтому с помощью пассивных методов теплового контроля обнаружить дефекты типа микропустот при глубине их залегания, превышающей 1 мм, практически невозможно.

В [5, 6] показано, что локальный объем изоляции в области усиления электрического поля является активным источником тепла. Под действием такого источника появляется тепловое пятно (локальная область повышенной температуры) на поверхности диэлектрика. В процессе развития разрушений как в полярных, так и неполярных диэлектриках наблюдается ступенчатый характер изменения перепада температуры на их поверхности, причем переход от предыдущей к последующей стадии разрушения всегда сопровождается увеличением перепада температуры в 1,5—2 раза. Такие закономерности были обнаружены при испытании полимерных диэлектриков в резконеоднородном электрическом поле. В этой связи представляло интерес оценить возможность применения тепловизионного метода для диагно-

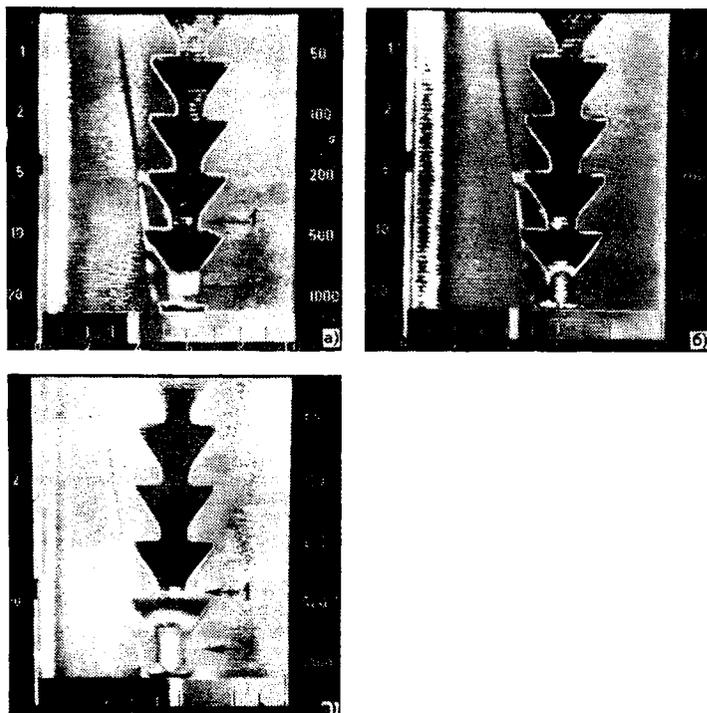
тики состояния изоляции реальных изоляционных конструкций. Для этого были проведены испытания кремнийорганических изоляторов ЛК-70/35 и ЛК-70/110 с дефектами типа микропустот размером 500—800 мкм. Глубина залегания дефектов от поверхности изоляторов, контролируемой тепловизором, составляла 16—17 мм. Дефект в изоляторе ЛК-70/35 находился на расстоянии 78 мм от края оконцевателя (под первой юбкой), а в изоляторе ЛК-70/100—190 мм (под четвертой юбкой).

Испытания изоляторов проводились напряжением промышленной частоты с помощью трансформатора ИОМ 100/100. При испытании изоляторов напряжением поднималось до уровня, при котором обнаруживается дефект по тепловому контрасту на их поверхности. При этом напряжении изолятор ЛК-70/35 испытывался до пробоя. Распределение температуры по поверхности изоляторов регистрировалось тепловизором АГА-680 (минимальное разрешение по перепаду температур составляет 0,2 °С).

В процессе подъема напряжения прежде всего наблюдался прогрев тела изоляторов непосредственно у оконцевателя за счет возникновения короны у его края. Напряжение, при котором начинался прогрев за счет короны, составляло 20 и 55 кВ для изолятора ЛК-70/35 и ЛК-70/110 соответственно. Перепад температур составлял 0,3—0,5 °С.

В изоляторе ЛК-70/110 дефект выявлялся при напряжении 90 кВ, величина локального перепада температур составляла 0,2 °С. При этом напряжении изолятор выдерживался в течение часа. За это время перепад температур над дефектом не изменялся, но наблюдался прогрев первых двух элементов (со стороны высокого напряжения). Перепад температур на поверхности элементов достигал 0,8 °С.

В изоляторе ЛК-70/35 дефект выявлялся при напряжении 66 кВ, при этом локальный перепад температур составлял 0,25 °С. В течение 1500 с перепад температур над дефектом оставался



постоянным, а через 30 с скачком увеличился до  $0,55^{\circ}\text{C}$ , при этом у оконцевателя (внутри стержня) начало развиваться разрушение. Через 3952 с перепад температур скачком увеличился до  $1,2^{\circ}\text{C}$  и оставался постоянным вплоть до пробоя изолятора. Пробой наступил через 17308 с от момента приложения напряжения и развивался на боковую поверхность (в области нахождения дефекта). Тепловые картины, иллюстрирующие процесс развития разрушения в изоляторе ЛК-70/35, приведены на рисунке (а —  $\Delta T=0,25^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau=420$  с; б —  $\Delta T=0,55^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau=1530$  с; в —  $\Delta T=1,2^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau=5482$  с), где обозначено: 1 — прогрев над дефектом; 2 — прогрев у оконцевателя за счет короны; 3 — прогрев над зоной развивающегося разрушения. Время до пробоя изолятора оценивалось по формуле:

$$\tau_{\text{пр}} = \eta \Delta \tau_2,$$

где  $\eta$  — эмпирический коэффициент, равный 4;  $\Delta \tau_2$  — интервал времени между моментом регистрации второго ( $\Delta T=0,55^{\circ}\text{C}$ ) и третьего ( $\Delta T=1,2^{\circ}\text{C}$ ) температурных скачков на поверхности изолятора.

Приведенная формула и значение коэффициента  $\eta$  получены статистической обработкой экспериментальных данных изменения температурно-временных параметров процесса разрушения полимерной изоляции в неоднородном электрическом поле. Объем выборки экспериментальных данных составлял не менее 30. Следует отметить, что формула может быть применена для оценки времени до пробоя изоляции, если коэффициент неоднородности внешнего электрического поля изоляционной конструкции больше 2. При этом максимальная ошибка между экспериментальным и расчетным значениями времени до пробоя не превышает 23 %.

При оценке времени до пробоя изолятора по интервалу времени  $\Delta \tau_2=3952$  с при  $\eta=4$  ошибка между экспериментальным и расчетным значениями времени составляет 9 %, т. е. приведенное выше соотношение может быть использовано для прогнозирования ресурса реальных изоляционных конструкций.

Контролируя распределение температуры на поверхности изделия, можно определять оптимальную длину полупроводящих покрытий, наносимых на стержень кремнийорганических изоляторов с целью выравнивания электрического поля. Так, при испытании стержней и изолятора ЛК-70/35 с покрытием из карбида кремния длиной 25, 45, 150 и 200 мм (длина стержня — 440 мм) было установлено, что практически равномерный прогрев стержней и изолятора наблюдается при длине покрытия от края оконцевателя, равной 150 мм. Причем, если в изоляторе без покрытия прогрев первых двух элементов (со стороны высокого напряжения) происходит при  $U=20-25$  кВ, то в изоляторе с покрытием равномерный прогрев начинается при  $U=52$  кВ. Эффект выравнивания поля исчезает при  $U=70$  кВ, так как в этом случае распределение температуры по длине изолятора становится неравномерным и происходит перегрев первых двух элементов со стороны высокого напряжения.

Анализ результатов испытаний позволяет сделать вывод о том, что тепловизионный метод можно применять в следующих целях:

1. Определение начальной стадии коронирования изоляторов и выбор оптимальной длины полупроводящих покрытий, используемых для выравнивания электрического поля.
2. Выявление микропустот в стержне изоляторов при глубине их залегания до 16—17 мм.
3. Качественная диагностика состояния изоляции, т. е. выявление начальной и последующих стадий разрушения по увеличению перепада температур над зоной развивающегося разрушения в 1,5—2 раза.
4. Оценка ресурса изоляторов по интервалу времени между моментами регистрации второго и третьего температурных скачков на их поверхности, если коэффициент неоднородности внешнего электрического поля больше 2.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 789667 (СССР). Способ неразрушающего контроля изделий/И. А. Бекешко. Оpubл. в Б. И., 1980, № 44.
2. А. с. 890204 (СССР). Способ тепловой дефектоскопии изделий из диэлектрических материалов/В. А. Дятлов. Оpubл. в Б. И., 1981, № 46.
3. А. с. 913242 (СССР). Способ определения местонахождения дефекта/В. Ф. Змитрук, В. Л. Сорокин. — Оpubл. в Б. И., 1982, № 10.
4. Вавилов В. П., Горбунов В. И., Елифанцев Б. Н. Двумерная задача тепловой дефектоскопии при конвективном теплообмене изделия с окружающей средой. — Дефектоскопия, 1975, № 2.
5. Гефле О. С., Дмитриевский В. С. Тепловая дефектоскопия высоковольтных изоляционных конструкций: Деп. рукопись. — М.: Информэлектро, 1983, № 395 эт. — Д83.
6. А. с. 1140024 (СССР). Способ контроля состояния изделий из диэлектрических материалов/О. С. Гефле. Оpubл. в Б. И., 1985, № 6.

[04.07.85]

УДК 62-83-52

## О «фрикционных» автоколебаниях в электроприводах

КЛЕПИКОВ В. Б., канд. техн. наук

Харьковский политехнический институт им. В. И. Ленина

В различных отраслях промышленности используются механизмы, нагрузка которых в рабочих или аномальных режимах представляет собой пару трения, одна из составляющих которой проскальзывает относительно другой.

К таким механизмам относятся вадки прокатных станов в режиме пробуксовки, колесные пары транспортных средств

и механизмов передвижения при боксовании и юзе, исполнительные механизмы шлифовальных, токарных и иных металлорежущих станков, механизмы поворота конвертора и другие. Известно, что если характеристика трения [т. е. зависимость силы трения от скорости проскальзывания  $F_{\tau}=f(v)$ ] содержит «падающий» участок, в механической системе с упругими связями могут воз-

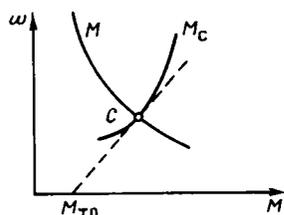


Рис. 1. Механические характеристики электродвигателя и механизма

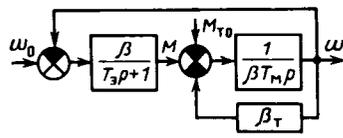


Рис. 2. Обобщенная структурная схема электропривода с нагрузкой типа пара трения

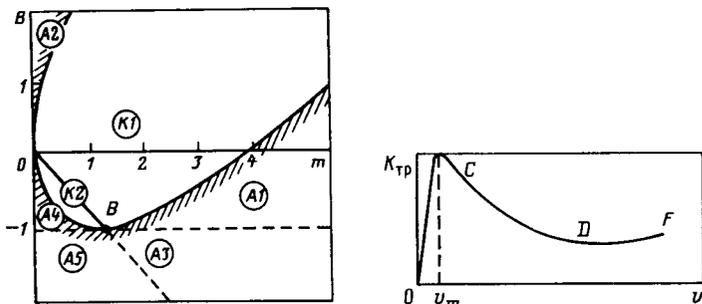


Рис. 3. Область динамических режимов одномассовой электро-механической системы

Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от скорости проскальзывания

никнуть так называемые фрикционные автоколебания [1—3]. Негативные последствия фрикционных автоколебаний заключаются в увеличении (иногда весьма значительном) упругих нагрузок в кинематических звеньях механизма, ухудшении качества технологического процесса, снижении производительности труда из-за необходимости прерывания технологического процесса при возникновении режима пробуксовки [4, 5]. Изучение фрикционных автоколебаний с целью устранения либо уменьшения негативного эффекта от них представляется весьма важной задачей.

Исследование фрикционных автоколебаний в механизмах проводилось в основном механиками при допущениях о постоянстве момента или скорости приводного электродвигателя. Между тем движение исполнительного механизма как составной части электро-механической системы характеризуется рядом особенностей, и в частности, появлением фрикционных автоколебаний иной природы, чем это описано в [1—3].

В статье рассматриваются условия развития в электроприводах с нагрузкой типа пара трения фрикционных автоколебаний, обуславливаемых не наличием упругих механических связей, а электро-механическими свойствами системы, устанавливается характер вышеуказанных автоколебаний, их амплитуда и частота, а также даются рекомендации по выбору параметров, исключающих автоколебания.

Покажем прежде всего, что для простейшего электропривода, представляемого одномассовой электро-механической системой с нагрузкой, зависящей от скорости, существует область динамического режима, имеющего расходящийся колебательный характер.

На рис. 1 представлены механические характеристики электродвигателя  $M=f(\omega)$  и механизма  $M_c=f(\omega)$ , которые в общем случае нелинейны. Уравнение механической характеристики нагрузки в окрестности точки статического равновесия  $C$  при условии линеаризации имеет вид

$$M_c = M_{T0} + \beta_T \omega, \quad (1)$$

где  $\beta_T$  — жесткость характеристики механизма в точке  $C$ .

Рассмотрим электропривод с электродвигателем, обладающим линейной или линеаризованной механической характеристикой и передаточной функцией в виде апериодического звена. Механическая часть рассматриваемого электропривода представляется приведенным жестким механическим звеном.

Анализ динамических свойств электропривода удобно проводить, используя обобщенные структурные схемы типовых электро-механических систем [6]. С учетом (1) структурная схема рассматриваемой системы приобретает вид, представленный на рис. 2. Если жесткость  $\beta_T$  — величина отрицательная, то обратная связь по  $\beta_T$  в схеме становится положительной. С физической точки зрения это имеет место, когда рабочая точка находится на так называемых «падающих» участках механической характеристики нагрузки, т. е. на таких, где возрастанию скорости соответствует снижение момента сопротивления  $M_c$ . Передаточная функция по управляющему воздействию для рассматриваемой структурной схемы имеет вид:

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{\omega_0(p)} = \frac{\beta}{(T_{э}p + 1)(\beta T_{м}p + \beta_T) + \beta}.$$

Введя обобщенные безразмерные параметры

$$m = T_{э}/T_{м};$$

$$b = \beta_T/\beta,$$

где  $\beta$  — модуль статической жесткости механической характеристики электродвигателя;  $T_{э}$ ,  $T_{м}$  — электромагнитная и электро-механическая постоянные электропривода, представим передаточную функцию в виде

$$W_p = \frac{1}{T_{э}T_{м}p^2 + T_{э}(m+b)p + (b+1)}. \quad (2)$$

Корни характеристического уравнения рассматриваемой системы:

$$p_{1,2} = \frac{T_{э}(m+b) \pm T_{э}\sqrt{(m+b)^2 - 4m(b+1)}}{2T_{э}T_{м}} \quad (3)$$

являются комплексными, если

$$(m+b)^2 < 4m(b+1),$$

что выполняется при условии

$$\left. \begin{aligned} b &> m - 2\sqrt{m}; \\ b &< m + 2\sqrt{m}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Отметим, что для часто рассматриваемых случаев работы электропривода с нагрузкой  $M_c = \text{const}$ , т. е. когда  $\beta_T = 0$ , соотношение (4) принимает вид известного условия колебательности:  $m < 4$  или  $T_{э} < 4T_{м}$ .

Неравенства (4) с учетом того, что в общем случае  $\beta_T$  (следовательно, и  $b$ ) может быть отрицательной величиной, определяют область параметров, в которой система представляет собой колебательное звено. Данная область на рис. 3 ограничена штриховкой. Вне этой области корни характеристического уравнения вещественны, и переходный процесс носит аperiodический характер.

Система консервативна, если

$$N = m + b = 0$$

или

$$b/m = -1,$$

что соответствует сочетанию параметров, определяемых точками на прямой  $OB$ . Величина  $N > 0$ , если

$$b/m > -1. \quad (5)$$

Для колебательных процессов условие (5) означает, что вещественные части корней  $p_{1,2}$  отрицательны, следовательно, колебания в системе носят затухающий характер с быстротой затухания, определяемой величиной

$$\delta = \frac{1}{2T_{м}}(m+b).$$

Указанный характер процесса имеет место при сочетании параметров  $b$  и  $m$ , определяемых точкой в колебательной области правее прямой  $OB$  (область  $K1$ ).

Рассмотрим теперь поведение системы, когда выполняются условия (4) и, кроме того,

$$b/m < -1, \quad (6)$$

т. е. когда рабочая точка находится в области  $K2$  (рис. 3). Согласно неравенствам (3) и (6) области  $K2$  принадлежат комплексные корни с положительной вещественной частью, что соответствует колебательному расходящемуся переходному процессу.

Для переходных процессов аperiodического характера, когда подкоренное выражение  $D$  в (2) положительно ( $D > 0$ ), оба корня будут отрицательны, если помимо условия (5) выполняется также

$$N > \sqrt{D}. \quad (7)$$

Это имеет место при

$$b > -1.$$

Затухающим переходным процессам аperiodического характера соответствуют области  $A1$  и  $A2$  (рис. 3). Если сочетанию параметров  $b$  и  $m$  соответствует точка в областях  $A3, A4, A5$  (рис. 3), переходный процесс аperiodически расходящийся, причем для области  $A5$  оба корня положительны, а для областей  $A3$  и  $A4$  положителен один из них.

Таким образом, динамические режимы одномассовой электромеханической системы характеризуются в общем случае наличием в пространстве параметров  $b$  и  $m$  семи областей, среди которых существует область, в которой переходный процесс носит расходящийся колебательный характер.

Покажем, что в реальных условиях нагрузки типа пара трения существование точки статического равновесия в области  $K2$  может привести к возникновению автоколебательного режима.

Как показывает сопоставление характеристик трения для различных механизмов, качественно они сходны. В общем случае по мере возрастания скорости проскальзывания в зависимости  $K_{тр} = f(v)$  (рис. 4) можно выделить участок резкого возрастания коэффициента трения в зоне малых скоростей (участок  $OC$ ), «падающий» участок  $CD$  и участок возрастания момента трения  $DF$  при больших скоростях. Характеристика симметрична относительно начала координат. Для выявления связанной с фрикционными автоколебаниями специфики движения электропривода системы и получения упрощенных соотношений введем допущения о возможности линеаризации «падающего» участка характеристики нагрузки в диапазоне перемещения рабочей точки и представления характеристики трения в виде двух линейных отрезков  $OC$  и  $CD$  (рис. 5).

Известно, что необходимым условием автоколебательного режима нелинейной системы является знакопеременность функции диссипации, характеризующей мощность потерь [7], что в нашем случае сводится к знакопеременности функции

$$N(t) = \beta T_m (1 + b/m). \quad (8)$$

Знакопеременность  $N(t)$  обеспечивается при перемещении рабочей точки с участка  $CD$  на участок  $OC$ . Действительно, из рис. 5 видно, что в области  $K2$  отношение  $b/m < -1$ , поэтому, когда рабочая точка находится на «падающем» участке характеристики трения, функция  $N(t)$  отрицательна. При переходе рабочей точки на восходящий участок  $OC$  значение  $\beta_T > 0$  и  $b > 0$ , поэтому функция  $N(t)$  здесь положительна.

Процесс развития автоколебаний происходит следующим образом. При возникновении режима проскальзывания одной составляющей пары трения относительно другой и попадании точки статического равновесия на «падающий» участок  $CD$  (рис. 5) флуктуационное возмущение вызовет колебание угловой скорости с небольшой амплитудой. Если данному режиму соответствует сочетание параметров  $b$  и  $m$ , принадлежащих области  $K2$ , колебательный процесс не затухает, а носит расходящийся характер. Возрастание амплитуды колебаний будет продолжаться до тех пор, пока рабочая точка в процессе колебания начнет попадать на восходящий участок характеристики трения  $OC$  (рис. 5). Перемещение рабочей точки по участку  $OC$  сопровождается интенсивным рассеиванием запасенной в системе колебательной энергии, что оказывает стабилизирующее действие. Условием самовозбуждения системы является, таким образом, попадание рабочей точки в область  $K2$ , что имеет место при выполнении соотношений (4) и (6).

Стационарный характер автоколебаний установится, когда интеграл от функции диссипации за период равен нулю, что для

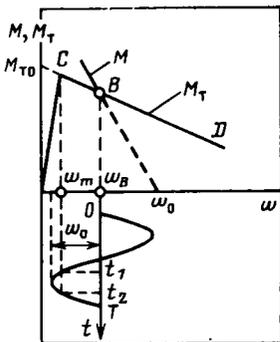


Рис. 5. Аппроксимированные характеристики электродвигателя и механизма

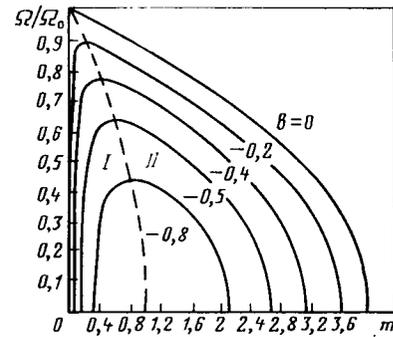


Рис. 6. Зависимости  $\Omega/\Omega_0 = f(m)$ : I — зона автоколебаний; II — зона затухающих колебаний

рассматриваемой электрической системы выполняется при условии

$$\int_0^T (b/m + 1) (d\omega/dt)^2 dt \approx 0. \quad (9)$$

Учитывая, что величина  $b$  в течение периода изменяет знак и принимает различные по модулю значения, условие (9) представляется в виде:

$$\left( \frac{|b_2|}{m} - 1 \right) \left[ \int_0^{t_1} \left( \frac{d\omega}{dt} \right)^2 dt + \int_{t_2}^T \left( \frac{d\omega}{dt} \right)^2 dt \right] = - \left( \frac{b_1}{m} + 1 \right) \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{d\omega}{dt} \right)^2 dt, \quad (10)$$

где  $b_1 = \beta_{T1}/\beta$ ;  $b_2 = \beta_{T2}/\beta$ ;  $\beta_{T1}$ ,  $\beta_{T2}$  — жесткости характеристики трения на участках  $OC$  и  $CD$ .

Физически (10) означает, что колебательная энергия, введенная в систему и оставшаяся нерассеянной за время нахождения рабочей точки на «падающем» участке характеристики трения, рассеивается во время перемещения рабочей точки по восходящему участку  $OC$  (рис. 5). Выполнение условия (10) несмотря на относительную непродолжительность интервала  $[t_1, t_2]$  обеспечивается не только изменением знака жесткости  $\beta_T$ , но и существенным возрастанием ее абсолютного значения в данном интервале, что и определяет существование стационарного режима автоколебаний.

Величина, определяемая разностью левой и правой частей соотношения (10), пропорциональна введенной за период и оставшейся нерассеянной колебательной энергии. Как видим, эта величина зависит от отношения  $|b_2|/m$  и для заданной системы электропривода тем больше, чем круче наклон «падающего» участка характеристики трения. Отсюда следует вывод, что в нестационарных режимах развитие автоколебаний до стационарного состояния происходит за меньшее число колебаний при более крутом наклоне «падающего» участка.

Приведем некоторые соотношения, необходимые при практических расчетах.

Собственная частота рассматриваемой электромеханической системы, как это следует из (3), равна

$$\Omega = \Omega_0 \sqrt{1 - (b+m)^2/4m}, \quad (11)$$

где  $\Omega_0 = \sqrt{1/T_0 T_m}$  — частота свободных колебаний при  $b = 0$ .

На рис. 6 представлены зависимости  $\Omega/\Omega_0 = f(m)$  при различных отрицательных значениях  $b$ , причем кривые слева от пунктирной линии (область I) соответствуют области автоколебательных режимов  $K2$ . Характер вышеуказанных кривых свидетельствует о существенном влиянии обобщенных параметров  $b$  и  $m$  на частоту фрикционных автоколебаний.

Амплитуда автоколебаний в общем случае может быть найдена решением уравнения (10). В установившихся режимах проскальзывания многих реальных механизмов скорость  $v_m$ , соответствующая максимуму коэффициента трения (рис. 4), весьма мала. Например, для транспортных средств она не превышает 2% средней скорости проскальзывания [8], поэтому в практических целях амплитуду колебаний скорости  $\omega_a$  для автоколебаний рассматриваемого типа можно приближенно принимать равной скорости  $\omega_B$  (рис. 5).

Таким образом, в простейшей одномассовой электромеханической системе с нагрузкой типа пара трения возможны автоколебательные режимы. Первопричиной автоколебаний в одномассовой электромеханической системе, как и автоколебаний, получивших в теории многомассовых механических систем название фрикционных [1—3], является наличие «падающего» участка в механической характеристике нагрузки. Однако необходимые факторы, обуславливающие развитие и существование автоколебаний, различны. В механических системах — это многомассовость и упругая связь, в электромеханической — электромагнитная инерционность и электромеханическая взаимосвязь. Поскольку обе разновидности автоколебаний могут существовать в электроприводе одновременно, чтобы различать их, условимся фрикционные автоколебания, обусловленные электромагнитными и электромеханическими свойствами электропривода, называть фрикционными автоколебаниями 2-го рода, а механическими свойствами — 1-го рода.

Вышеуказанное еще раз подтверждает тот факт, что применение электродвигателя в качестве источника механической энергии придает механизму новые свойства, и его движение следует определять, анализируя движения электропривода как единой электромеханической системы.

Укажем на некоторые моменты, связанные с фрикционными автоколебаниями 2-го рода. Эти автоколебания возникают при относительно малых ( $m < 1$ ) значениях отношения  $T_M/T_\beta$ . В свою очередь, уменьшение электромеханической постоянной  $T_M = J/\beta$  наблюдается при повышении жесткости механической характеристики электродвигателя.

Таким образом, вероятность возникновения автоколебаний при работе на более жестких участках характеристики двигателя возрастает. В электроприводах с переменной жесткостью механической характеристики (например, тяговых) при наличии проскальзывания составляющих пары трения относительно друг друга существование автоколебаний зависит от места нахождения рабочей точки на указанной характеристике. Вероятность возникновения фрикционных автоколебаний возрастает также в электроприводах с большой электромагнитной постоянной времени, что характерно для электроприводов постоянного тока со сглаживающими дросселями в якорной цепи.

Таким образом, стремление обеспечить в электроприводах повышение жесткости  $\beta$  для расширения диапазона регулирования и снижение пульсаций тока для уменьшения нагрева зачастую способствует возникновению фрикционных автоколебаний. Нелинейный характер зависимости нагрузки типа пара трения вызывает изменение величины  $\beta_T$  при изменении скорости проскальзывания, что также может объяснить наличие или отсутствие фрикционных автоколебаний в различных режимах одного и того же механизма. По крайней мере, для электроприводов с нагрузкой типа пара трения представляется целесообразным проводить проверку возможности возникновения данных колебаний и в случае необходимости корректировать в соответствии с зависимостями рис. 3 параметры электропривода таким образом, чтобы исключить перемещение рабочей точки в область автоколебаний.

Влияние каждой из разновидностей фрикционных автоколебаний (1-го и 2-го рода) на движение рабочего органа и работу электропривода различно. Расчеты показывают, что колебания 1-го рода имеют, как правило, более высокую частоту. Коэффициент электромеханической связи  $k_{э.с}$  [9], по которому при фрикционных автоколебаниях удобно оценивать электромеханическую взаимосвязь на данных частотах для электроприводов

многих механизмов, весьма низок, как это, например, показано в [10]. В этом случае расчеты упругих моментов можно вести, пренебрегая влиянием данной связи. Фрикционные автоколебания 2-го рода имеют, как правило, более низкую частоту, порождают большие колебания рабочего органа, обуславливают заметные колебания тока электродвигателя, сильнее влияя на его дополнительный нагрев.

Моделирование рассматриваемой системы на АВМ и данные экспериментов подтверждают существование автоколебательных режимов в области параметров  $b$  и  $m$ , принадлежащих области  $K2$  (рис. 3).

**Выводы.** 1. Динамический режим простейшей одномассовой электромеханической системы с нагрузкой, зависящей от скорости, в общем случае определяется двумя обобщенными параметрами: отношением электромеханической постоянной времени к электромагнитной и отношением жесткости механической характеристики нагрузки к модулю статической жесткости характеристики электродвигателя. В пространстве данных параметров существует семь областей динамических режимов, среди которых — область расходящегося колебательного процесса.

2. В реальных условиях работы электропривода на нагрузку типа пара трения при попадании рабочей точки в область расходящегося колебательного процесса возникают автоколебания, условно названные фрикционными автоколебаниями 2-го рода. Устранение фрикционных автоколебаний достигается соответствующим подбором вышеуказанных параметров и, в частности, выполнением условия  $T_M/T_\beta > 1$ .

3. При проектировании и расчетах электроприводов механизмов, представляющих нагрузку типа пара трения с характеристикой, содержащей «падающий» участок, следует проводить проверку на существование режима фрикционных автоколебаний.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний — М.: Физматгиз, 1959.
2. Каудерер Г. Нелинейная механика. — М.: Изд-во иностр. литературы, 1961.
3. Штейнвольф Л. И. Качественная теория фрикционных автоколебаний в механических передачах. — В кн.: Теория механизмов и машин. Изд. ХГУ, вып. 1, 1966.
4. Шахтарь П. С., Ренгевич А. А. и др. Причины поломок осей рудничных электровозов. — В кн.: Сб. Вопросы рудничного транспорта. — М.: Госгортехиздат, 1962.
5. Целиков А. И. Теория расчета условий в прокатных станках. — М.: Металлургиздат, 1961.
6. Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А. С. Теория автоматизированного электропривода. — М.: Энергия, 1979.
7. Основы теории колебаний/В. В. Мигулин, В. И. Медведев, Е. Р. Мустель, В. И. Парыгин. — М.: Наука, 1978.
8. Исаев И. П. Случайные факторы и коэффициент сцепления. — М.: Транспорт, 1970.
9. Ключев В. И. Ограничения динамических нагрузок электропривода. — М.: Энергия, 1971.
10. Клепиков В. Б., Угвусие С. О. К оценке фрикционных автоколебаний в электроприводе рудничного электровоза. — В кн.: Вестник ХПИ. Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий. — Харьков: Вища школа, 1984, № 214, вып. 9.

[08.10.85]

УДК 621.313.322.001.24

## Метод определения э. д. с. и индуктивных сопротивлений синхронных генераторов малой мощности на частотах высших гармоник

ШИРОКОВ Н. Г., КУТУЗОВ С. И.

Москва

В практике проектирования автономных систем электропитания при оценке качества электроэнергии и выборе параметров фильтров, ограничивающих высшие гармонические составляющие напряжения в системе до требуемого уровня, необходимо знать э. д. с. и индуктивные сопротивления синхронного генератора на частотах высших гармоник. В настоя-

щее время аналитического метода определения указанных параметров синхронного генератора не существует, что объясняется сложностью нелинейных зависимостей параметров генератора на высших гармониках от режима работы генератора по основной гармонике.

Описываемый в статье метод позволяет определить парамет-

Вологодская областная универсальная научная библиотека

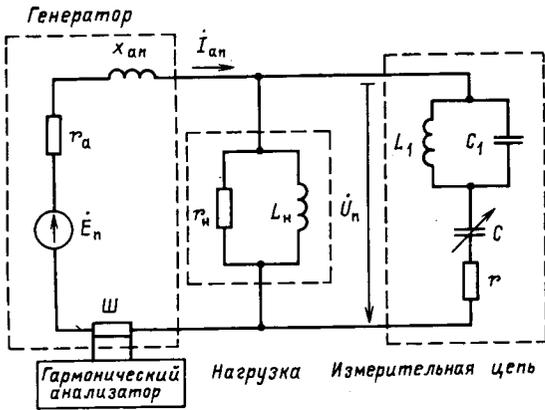


Рис. 1

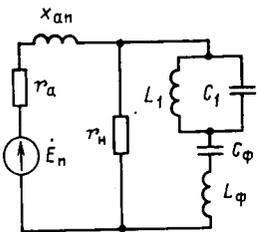


Рис. 2

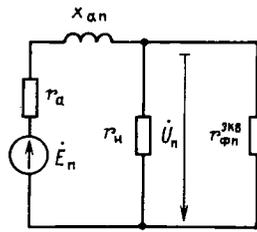


Рис. 3

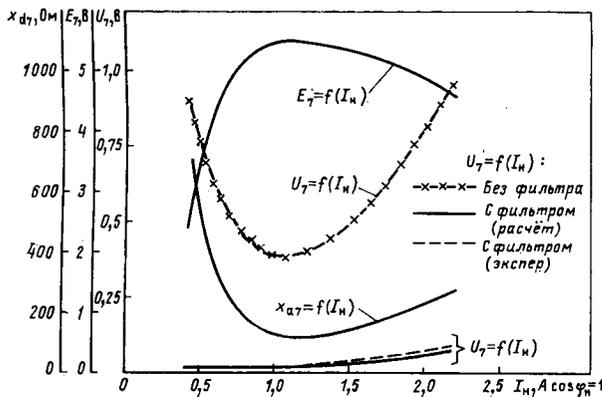


Рис. 4

ры синхронного генератора на высших гармониках, соответствующие рабочему режиму по основной гармонике. Структурная схема эксперимента изображена на рис. 1. Для реализации метода синхронный генератор с помощью нагрузки (резистор  $r_n$ , индуктивная катушка  $L_n$ ) выводится на один из рабочих режимов по основной гармонике. С помощью измерительной цепи (параллельный контур  $L_1C_1$ , резистор  $r$ , конденсатор  $C$ ) в системе генератор — внешняя цепь обеспечивается максимум тока исследуемой гармоники  $I_{an}$  в ветви генератора. Указанный режим реализуется изменением емкости конденсатора  $C$  и фиксируется гармоническим анализатором, включенным в ветвь генератора посредством шунта. При этом параллельный контур  $L_1C_1$  измерительной цепи настраивается в резонанс токов по основной гармонике. Это обстоятельство вместе с выбором соответствующего значения резистора  $r$  позволяет исключить влияние измерительной цепи на режим работы синхронного генератора по основной гармонике. Кроме того, фиксированный режим работы генератора по основной гармонике позволяет рассматривать всю систему как линейную для токов высших гармоник.

Здесь существо метода излагается для случая активной нагрузки генератора по основной гармонике.

В соответствии со схемой на рис. 1 результирующее сопротивление  $Z_n$  относительно источника э. д. с.  $E_n$  определяется из выражения:

$$Z_n = r_a + jx_{an} + \frac{r_n(r - jx_{cn})}{r_n + (r - jx_{cn})}, \quad (1)$$

где  $x_{cn}$  — эквивалентное емкостное сопротивление измерительной цепи для  $n$ -й гармоники;  $r_a$  — активное сопротивление фазы якоря;  $x_{an}$  — индуктивное сопротивление фазы якоря для  $n$ -й гармоники. В свою очередь,

$$x_{cn} = (n\omega_1 C)^{-1} + \frac{\frac{L_1}{C_1}}{n\omega_1 L_1 - \frac{1}{n\omega_1 C_1}}. \quad (2)$$

После преобразований выражение (1) принимает вид:

$$Z_n = \left[ r_a + \frac{r_n(r_n + r^2 + x_{cn}^2)}{(r_n + r)^2 + x_{cn}^2} \right] + j \left[ x_{an} - \frac{r_n^2 x_{cn}}{(r_n + r)^2 + x_{cn}^2} \right]. \quad (3)$$

Условие, при котором ток принимает максимальное значение,

$$\frac{d(z_n^2)}{dx_{cn}} = 0, \quad (4)$$

где

$$z_n^2 = |Z_n|^2 = \left[ r_a + \frac{r_n(r_n r + r^2 + x_{cn}^2)}{(r_n + r)^2 + x_{cn}^2} \right]^2 + \left[ x_{an} - \frac{r_n^2 x_{cn}}{(r_n + r)^2 + x_{cn}^2} \right]^2.$$

Решение (4) относительно  $x_{an}$  имеет вид:

$$x_{an} = \left\{ r_a \left[ (r_n + r)^2 + x_{cn}^2 \right] + r_n (r_n r + r^2 + x_{cn}^2) \right\} \times \frac{\left[ 2x_{cn} r_n^2 (r_n + r) \right] + r_n^4 x_{cn} \left[ (r_n + r)^2 - x_{cn}^2 \right]}{r_n^2 \left[ (r_n + r)^4 - x_{cn}^4 \right]}. \quad (5)$$

В (5) параметр  $x_{cn}$ , определяемый из (2), вычисляется по значению емкости конденсатора  $C$ , при которой ток  $I_{an}$  в ветви генератора максимален.

При нахождении э. д. с. машины  $E_n$  используются данные эксперимента по определению напряжения исследуемой гармоники  $U_n$  на клеммах генератора при заданной нагрузке  $I_n \times (\cos \phi_n)$  по основной гармонике и отключенной измерительной цепи. По найденным из эксперимента  $x_{an}$ ,  $U_n$  и известным  $r_a$ ,  $r_n$  определяется э. д. с. генератора:

$$E_n = U_n \sqrt{\left( 1 + \frac{r_a}{r_n} \right)^2 + \frac{x_{an}^2}{r_n^2}}. \quad (6)$$

Методика определения параметров синхронного генератора по высшим гармоникам при смешанной нагрузке (активно-индуктивной) аналогична.

Для проверки правильности найденных параметров машины  $x_{an}$  и  $E_n$  был проведен эксперимент по определению зависимостей высших гармоник напряжения на клеммах генератора от тока нагрузки  $U_n = f(I_n)$  при наличии на клеммах генератора фильтров высших гармонических с известным эквивалентным сопротивлением на резонансной частоте фильтрации  $r_{фн}^{экв}$ .

Структура фильтров показана на рис. 2. Параллельное звено  $L_1C_1$  фильтра, настроенное в резонанс на частоте основной гармоники генератора, необходимо для исключения воздействия фильтра на поле машины и соответственно на  $x_{an}$  и  $E_n$  при заданном токе нагрузки  $I_n$ . Экспериментальные кривые  $U_n = f(I_n)$  были сопоставлены с соответствующими расчетными, полученными в соответствии со схемой на рис. 3 при найденных из эксперимента  $x_{an}$ ,  $E_n$  и известных  $r_a$ ,  $r_n$  и  $r_{фн}^{экв}$ .

В качестве примера на рис. 4 приведены расчетные и экспериментальные кривые  $U_7 = f(I_n)$ , а также параметры  $x_{a7} = f(I_n)$ ,  $E_7 = f(I_n)$ , для седьмой гармоники авиационного однофазного генератора мощностью 250 В·А, 115 В, 400 Гц,  $r_a = 4,8$  Ом при  $r_{фн}^{экв} = 4,2$  Ом. Как видно из рис. 4, расчетные и экспериментальные кривые  $U_7 = f(I_n)$  при наличии фильтра седьмой гармоники практически совпадают, что подтверждает соответствие определенных по изложенному выше методу параметров машины  $x_{an}$  и  $E_n$  реальным.

# Низковольтные характеристики материала на основе каучука с углеродным наполнителем для объемных резисторов

ГОЛИЦЫН В. П., канд. техн. наук, ГОРЕЛОВ В. П., канд. техн. наук,  
МИАКОВА Н. Н., инж., СКВИРСКАЯ И. И., канд. техн. наук, УШАКОВ В. Я., доктор техн. наук

Одним из перспективных направлений в разработке высоковольтных элементов, способных рассеивать большую энергию в импульсном режиме работы, является создание объемных резисторов. С этой точки зрения наиболее хорошо зарекомендовали себя в отечественной практике бетоловые резисторы. Изготавливаемые из дешевого и доступного исходного сырья по безотходной технологии, они способны выдерживать тепловой удар. Однако бетоловые резисторы характеризуются высоким водопоглощением, их размеры ограничены техническими возможностями прессования крупногабаритных изделий из бетона. Оба указанных недостатка обусловлены свойствами связующего материала. Поэтому актуальными являются поиски и разработка материала для объемных резисторов со связующим, свободным от этих недостатков.

Анализ свойств материалов, применяемых в резисторах различного назначения, показал, что предпосылки для использования в качестве материала для изготовления высоковольтных резисторов имеются у каучуков с углеродным наполнителем. Материал характеризуется невысокой стоимостью, доступностью исходных компонентов, простой технологии изделий сложной формы, весьма низким водопоглощением. Кроме того, промышленностью освоена и широко применяется технология приготовления композиционных смесей на основе каучуков.

Основная задача при разработке резисторов заключается в создании электропроводящей структуры, сопротивление которой легко бы регулировалось и было стабильным при воздействии различных эксплуатационных факторов: импульсных электрических нагрузок, температур, влажности и др. Решение этой задачи включало анализ существующих рецептов на основе различных каучуков и последующую целенаправленную их разработку и испытания.

Среди каучуков общего назначения были выбраны бутилкаучук как представитель кристаллических каучуков и бутадиенмелтиррольный как представитель аморфных каучуков. В качестве электропроводящего компонента использован технический углерод печного типа различных марок, отличающихся размером агрегатов (ПМ-50, ПМ-100, ПМЭ-100 В). Однако в отличие от известного способа регулирования сопротивления композиция изменением концентрации электропроводящего компонента применен способ, основанный на модификации технического углерода [1]. Удельное объемное сопротивление материала регулировалось от  $10^{-1}$  до  $10^6$  Ом·м путем введения техуглерода, модифицированного за счет экстракции, термообработки в различных средах, нанесения дополнительных соединений, при изменении его концентрации в узких пределах (40—80 в. ч.).

Электрофизические характеристики исследованы на модельных образцах (цилиндры диаметром и высотой 5 см). Определиться разброс сопротивления при серийном изготовлении, зави-

симость удельного объемного сопротивления материала от воздействия внешней среды (воды, воздуха, трансформаторного масла), температуры, напряженности поля. Сопротивление измерялось в соответствии с ГОСТ 21342.20—78, температурный коэффициент сопротивления — согласно ГОСТ 21342.15—78. Форма вольт-амперной характеристики в диапазоне напряжений  $U_2$  и  $U_1=0,1 U_2$  характеризовалась показателем нелинейности  $\alpha$ , который определяется как

$$\alpha = \frac{\lg U_2 - \lg U_1}{\lg I_2 - \lg I_1}.$$

Установлено, что разброс значений сопротивления в серии однотипных образцов не превышает 22 % несмотря на то, что серии отличались по номинальному сопротивлению на шесть порядков. Этот разброс в 2—3 раза меньше, чем при регулировании сопротивления материала в том же диапазоне только за счет изменения концентрации технического углерода (рис. 1). Годовая нестабильность сопротивления материала составила 4—8 % в воде, 4—15 % на воздухе, до 5—7 порядков в трансформаторном масле.

Характер изменения удельного сопротивления при циклическом нагревании — охлаждении образцов на основе бутилкаучука независимо от использованной марки и модификации электропроводящего компонента качественно одинаков: с повышением температуры удельное сопротивление повышается, а от цикла к циклу несколько снижается (рис. 2). Следует отметить, что при нагревании примерно до 120—140 °С удельное сопротивление практически не изменяется. Резкая нестабильность сопротивления проявляется выше указанного температурного предела.

Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) полимерного резистивного материала в диапазоне значений удельного сопротивления  $10^{-1}$ — $10^6$  Ом·м изменяется в пределах от 0,001 до 0,01 град<sup>-1</sup> (без предварительной термотренировки). Значение ТКС чувствительно к типу и модификации электропроводящего компонента (см. таблицу). При этом наблюдается известная в литературе закономерность — ТКС повышается при увеличении сопротивления материала. Однако из-за принятого способа регулирования сопротивления зависимость ТКС от сопротивления выражена относительно слабо. Независимо от марки использованного технического углерода зависимость  $\text{ТКС} = f(\rho_v)$  характеризуется насыщением: начиная с середины диапазона изменения сопротивления, его повышение на 1—1,5 порядка увеличивает ТКС только на 30—40 % (рис. 3). Это означает, что использование модифицированного технического углерода наиболее перспективно для получения высокоомных композиций, ко-

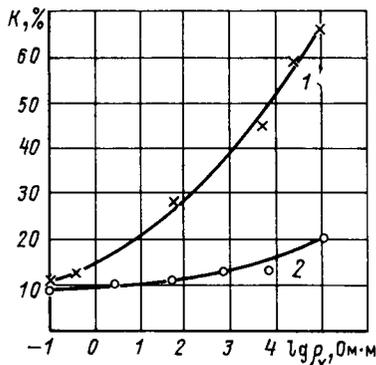


Рис. 1. Зависимость разброса удельного объемного сопротивления в серии от способа его регулирования (связующее БК-2055):

1 — регулирование путем изменения концентрации технического углерода; 2 — путем модификации углерода при концентрации 65 в. ч.

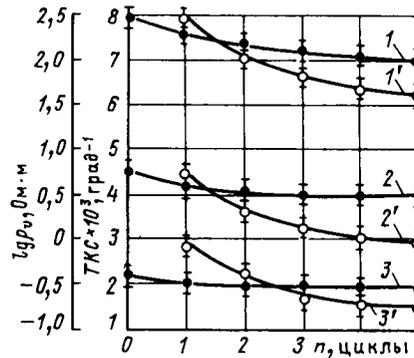


Рис. 2. Зависимость температурного коэффициента сопротивления (кривые 1—3) от количества циклов нагревания — охлаждения (связующее БК-2055, температуры 20—200 °С): 1, 1' — 65 в. ч. ПМ-50; 2, 2' — ПМ-100; 3, 3' — ПЭМ-100 В

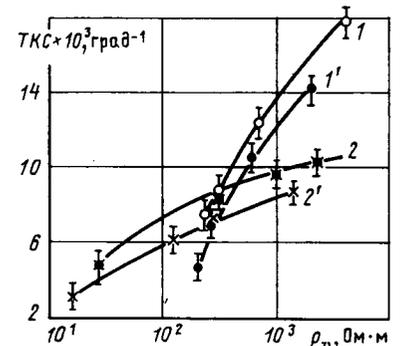


Рис. 3. Зависимость ТКС от  $\rho_v$  композиции (БК-2055; ПМ-100): 1, 1' — при изменении концентрации технического углерода в пределах 40—80 в. ч.; 2, 2' — при модифицированном углероде (65 в. ч.); 1, 2 — после технологического цикла; 1', 2' — после 4-кратного нагревания-охлаждения

## Влияние модификации поверхности [технического] углерода различных марок на ТКС композиции на основе бутилкаучука при циклическом воздействии температуры (наполнение 65 в. ч. на 100 в. ч. каучука)

Марка технического углерода	Способ модификации поверхности частиц технического углерода	1-й цикл		5-й цикл	
		ТКС, $10^{-3}$ град $^{-1}$			
		20—200 °С	20—50 °С	20—200 °С	20—50 °С
ПМ-50	Исходный	7,8	3,2	6,3	2,9
	Обработка ацетоном	9,6	3,5	8,2	3,3
	Термообработка в окислительной среде, 400 °С, 4 ч	8,0	3,3	5,4	3,0
	Обработка 4 %-ным ПАУ, 900 °С, 30 мин	4,5	3,1	2,8	2,8
	Термообработка, 900 °С, 30 мин	7,1	3,2	5,2	2,9
ПМ-100	Обработка 4 %-ным полиэтиленгликольадипинатом	10,7	3,4	7,3	3,2
	Исходный	4,5	2,8	3,1	2,4
	Обработка ацетоном	5,1	2,9	3,7	2,6
	Обработка 6 %-ным ПАУ, 900 °С, 30 мин	1,9	2,7	1,0	2,4
	Обработка 6 %-ным полиэтиленгликольадипинатом	5,2	2,9	4,1	2,6
ПМЭ-100 В	Термообработка, 900 °С, 30 мин	4,1	2,9	2,9	2,6
	Исходный	2,7	2,4	1,6	2,2

торы в традиционном исполнении имеют большую нестабильность сопротивлений.

В области отрицательных температур ТКС резисторов составляет  $2 \cdot 10^{-3}$ — $3,8 \cdot 10^{-3}$  град $^{-1}$  и при регулировании сопротивления материала за счет вида электропроводящего компонента практически не изменяется (см. таблицу). Снижение удельного сопротивления по сравнению с исходным равно 3—5 % (за пять циклов охлаждения) для образцов всех исследованных составов.

Вольт-амперная характеристика полимерных резисторов практически линейна: во всем диапазоне регулирования сопротивления показатель нелинейности изменяется от 0,6 до 0,97. При увеличении напряженности поля нелинейность несущественно возрастает — на 20 % при увеличении напряженности от 20 до 150 кВ/см (рис. 4). Такая слабая нелинейность обусловлена особенностью строения частиц электропроводящего компонента: неправильной формой частиц, размытостью поверхностного слоя.

Анализ зависимости низковольтных электрофизических характеристик от состава материала показал, что все исследованные параметры сильно зависят от типа электропроводящего и связующего компонентов. Максимальная нестабильность удельного сопротивления независимо от дестабилизирующего фактора наблюдается при уменьшении концентрации углерода, использовании аморфного каучука и применении низкодисперсных марок технического углерода.

Результаты исследования нестабильности удельного сопротивления при воздействии внешней среды соответствуют представлениям о химической природе старения наполненных полимеров при воздействии внешней среды [2], несмотря на особен-

ности данных резистивных композиций — повышенное содержание технического углерода и использование электропроводящих марок углерода. Известное в литературе практически ничтожное водопоглощение каучука обуславливает чрезвычайно высокую стабильность удельного сопротивления. На воздухе резистор подвергается старению за счет окисления каучука в поверхностном слое.

Набухание полимера в трансформаторном масле вызывает незначительное увеличение толщины полимерной прослойки между частицами углерода, но существенное (на 3—7 порядков) увеличение удельного сопротивления. Этот эффект согласуется с установленной ранее расчетным путем экспоненциальной зависимостью сопротивления от толщины диэлектрической прослойки между полупроводниковыми частицами [3]. Поскольку наиболее чувствительным к воздействующим факторам компонентом в рассматриваемых композициях является связующее, то большая стабильность сопротивления всегда наблюдается у композиций с максимальной долей непосредственно контактирующих между собой частиц технического углерода. Поэтому для обеспечения стабильности сопротивления резисторов, предназначенных для работы в трансформаторном масле, на резистивное тело в процессе шприцевания следует наносить защитную оболочку из полимерной композиции на основе стойкого к набуханию каучука с максимальной долей непосредственно контактирующих между собой частиц (СКН-40, 120 в. ч. ПМЭ-100 В).

Можно изготавливать резистивное тело и полностью из указанной маслястойкой композиции. Однако она имеет  $\rho_v$  около 0,02 Ом·м и, следовательно, пригодна для изготовления только низкоомных резисторов. Нанесение защитной оболочки практически не усложняет технологию изготовления и позволяет обеспечить работу в масле резисторов широкой номенклатуры — от низкоомных до высокоомных.

Происходящие при действии повышенных температур в связующем снижении механических напряжений, углубление процессов вулканизации и т. д. стабилизируются со временем в результате многократного нагревания [4], что и приводит к стабилизации  $\rho_v$  и ТКС. Процессами, происходящими в связующем при нагревании, обусловлена и зависимость изменения  $\rho_v$  и ТКС от марки и модификации технического углерода, определяющих толщину и количество прослоек связующего между электропроводящими частицами. Композиции с преобладанием омического механизма проводимости (в присутствии высокоструктурного технического углерода или модифицированного термообработкой) характеризуются максимальной стабильностью к действию температуры. В области отрицательных температур замедляются термохимические процессы в связующем, что обуславливает слабую зависимость температурного коэффициента сопротивления материала от вида электропроводящего компонента [5].

Важным достоинством резистивного материала на основе каучука с углеродным наполнителем является его эластичность. Механические воздействия не приводят к разрушению резистора. Лишь при механических воздействиях выше некоторого крити-

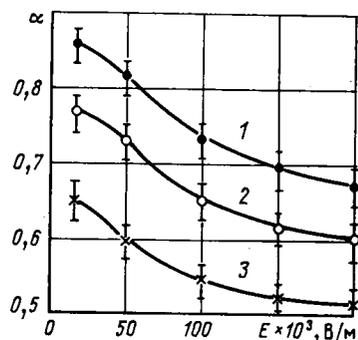


Рис. 4. Зависимость показателя нелинейности  $\alpha$  от напряженности поля для композиции на основе БК-2055, содержащего модифицированный технический углерод марки ПМ-50: 1 — 6 % ПАУ, 900 °С, 30; 2 — исходный; 3 — экстракция ацетоном

ческого наблюдается изменение сопротивления. Например, в случае сжимающего усилия такое изменение происходит при давлении больше 150 кг/см<sup>2</sup>.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что пригодной для объемных резисторов является любая известная рецептура, однако на основе каучука с максимально возможным числом кристаллических упорядоченных зон (например, бутилкаучука [6]), измененная следующим образом:

концентрация технического углерода выбирается соответствующей состоянию насыщения на кривой зависимости удельного объемного сопротивления от концентрации углерода для принятого типа связующего (около 60—70 в. ч. на 100 в. ч. каучука);

регулирование сопротивления осуществляется за счет применения модифицированного технического углерода при принятой выше концентрации.

Резисторы, изготовленные из таких материалов, обеспечивают широкий диапазон регулирования сопротивления (10<sup>-1</sup>—10<sup>6</sup> Ом·м), удовлетворительную воспроизводимость в сериях (до 22 %), хорошую стабильность при действии внешней среды и удовлетворительную температурную стабильность даже при отсутствии предварительной тренировки.

УДК 621.372.412/.414:537.228.1

## Локальные потери энергии в пьезокерамическом резонаторе при электрическом возбуждении

МЕЖЕРИЦКИЙ А. В., КАНДЫВА П. Е.

Москва

Исследование распределения энергетических потерь по объему резонаторов в процессе электромеханических колебаний представляет интерес для оптимизации их характеристик режимов эксплуатации. Объемные волны в пьезоэлектрике представляют собой связанные электрические и механические поля [1]. Эффект связанности электроупругого поля в наибольшей степени проявляется в пьезокерамических материалах системы цирконата-титаната свинца (ЦТС), характеризующихся большими значениями коэффициента электромеханической связи [2] — вплоть до 0,8.

В статье рассматривается случай слабых полей в предположении отсутствия свободных объемных зарядов, решение задачи проводится в квазиэлектростатическом приближении с потенциальной напряженностью электрического поля  $\vec{E}$ . Зависящие от времени величины представляются в виде  $A(t) = Ae^{i\omega t}$ , комплексное сопряжение обозначено (\*), двойная свертка тензоров — (:).

Источник электрического возбуждения создает плотность тока смещения  $\vec{j} = \vec{D}'_t$ , откуда локальная мощность потерь энергии источника

$$p = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \vec{E} \vec{j}^* = -\frac{\omega}{2} \vec{E} \operatorname{Im} \vec{D}^*.$$

Суммарные потери энергии в резонаторе объемом  $\Omega$

$$P = \int_{\Omega} p d\Omega = \frac{1}{2} \operatorname{Re} V I^* = \frac{1}{2} |V|^2 \operatorname{Re} Y,$$

где  $Y$  — комплексная проводимость резонатора.

В выражение для потерь энергии источника входят только электрические величины, и их связь с механическими характеристиками устанавливается с помощью уравнений пьезоэффекта.

Согласно [3] из уравнения движения элементарного объема  $\nabla T = \rho \vec{U}''_{tt}$  следует уравнение движения в энергетическом представлении:

$$\nabla (\vec{U}^* T) = T : S^* - \rho |\vec{U}'_t|^2, \quad (1)$$

где  $T, S$  — тензоры соответственно механических напряжений и деформации;  $\vec{U}$  — вектор смещения;  $\nabla$  — векторный оператор.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов Б. А., Голицын В. Я., Минакова Н. Н. Влияние состояния поверхности проводящего компонента на электропроводность композиционного материала. — ЭП. Электротехнические материалы, 1983, № 7, с. 8—10.
2. Пиотровский К. Н., Тарасова З. Н. Старение и стабилизация синтетических каучуков и вулканизатов. — М.: Химия, 1980. — 264 с.
3. Анисимов Б. А., Минакова Н. Н., Горелов В. П. Исследование механизма электропроводности композиционных материалов на полимерной связке. — В кн.: Гибкие электропроводящие материалы и устройства на их основе для обогрева людей и техники (тезисы докладов конференции)/Под ред. Д. М. Карпиноса. Киев: ИПМ АН УССР, 1982, с. 132—133.
4. Донцов А. А. Процессы структурирования эластомеров. — М.: Химия: 1978. — 287 с.
5. Влияние природы технического углерода на релаксацию напряжения в рамках из СКИ-3/Н. Н. Лежнев, Н. Н. Лялина, И. Г. Горелова, А. Е. Золкина. — Каучук и резина, 1979, № 10, с. 26—28.
6. Горелов В. П., Рубченко Ю. А. К вопросу применения резистивного материала рапита в высоковольтной технике. — В кн.: Техника высоких напряжений и электрическая прочность изоляции/Под ред. В. Я. Ушакова. Томск, 1978, с. 148—154. [26.06.85]

После интегрирования (1) по объему резонатора в силу граничных условий получаем

$$\int_{\Omega} \nabla (\vec{U}^* T) d\Omega = \int_{\tau} (\vec{U}^* T) \vec{n} d\tau = 0,$$

где  $\tau$  — полная поверхность объема  $\Omega$  с нормалью  $\vec{n}$ .

Тогда для резонатора в целом следует равенство потенциальной и кинетической энергии:

$$\int_{\Omega} T : S^* d\Omega = \rho \int_{\Omega} |\vec{U}'_t|^2 d\Omega.$$

Для элементарного объема согласно (1) разность потенциальной и кинетической энергий равна приращению потока энергии, вызванного перераспределением механической энергии. Необратимые потери энергии механического поля в этом случае описываются мнимой частью (1):  $\operatorname{Im} \nabla (\vec{U}^* T) = \operatorname{Im} T : S^*$ . Далее используется матричное представление тензоров  $T$  и  $S$  по [4]:

$$T : S^* = \sum_{i=1}^6 T_i S_i^*.$$

При механических колебаниях непьезоэлектрической среды механические потери феноменологически описываются мнимой частью упругой константы (податливости  $S_{ik}$ ), являющейся следствием фазового сдвига между механическим напряжением  $T$  и реакцией в виде деформации  $S$ , при этом мощность механических потерь соответствует площади, ограниченной кривой гистерезиса  $T(S)$ . Аналогично для случая диэлектрика, не обладающего пьезосвойствами, диэлектрические потери описываются мнимой частью диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{mi}$ , вызванной фазовым сдвигом между напряженностью электрического поля  $E$  и индукцией  $D$ . В пьезоэлектрике взаимосвязь между электрическими и механическими характеристиками описывается пьезомодулем, в частности  $d_{mi}$ , который, как установлено непосредственными измерениями [5] фазового сдвига между напряженностью электрического поля  $E$  и механической деформацией  $S$  в квазистатическом режиме, в общем случае имеет ненулевую мнимую часть.

Комплексный пьезомодуль через уравнения движения и пьезоэффекта изменяет фазовые соотношения колебательного процесса, что создает дополнительный вклад в энергетические

Потери, а также изменяет характер их распределения по объему пьезоэлектрика при неравномерном электрическом или механическом нагружении.

Воспользуемся уравнениями пьезоэффекта в виде [4]:

$$S_i = S_{ik}^E T_k + d_{mi} E_m; \quad D_l = e_{ml}^T E_m + d_{lk} T_k.$$

Согласно [4 и 6] константы пьезокерамического материала представляются в комплексном виде:

$$S_{ik}^E = S'_{ik} - iS''_{ik}; \quad e_{ml}^T = e'_{ml} - ie''_{ml}; \quad d_{ml} = d'_{ml} - id''_{ml},$$

а механические и электрические параметры колебаний, имеющие в общем случае взаимный фазовый сдвиг, в виде

$$T_k = \bar{T}_k e^{i\varphi_k^T}; \quad E_m = \bar{E}_m e^{i\varphi_m^E},$$

где  $\bar{T}_k, \bar{E}_m$  — соответственно модули  $T_k$  и  $E_m$ . Тогда

$$T_k T_i^* = \bar{T}_k \bar{T}_i e^{-i\varphi_{ki}^T}; \quad T_k E_m^* = \bar{T}_k \bar{E}_m e^{-i\varphi_{km}^{TE}},$$

где  $\varphi_{ki}^T = \varphi_i^T - \varphi_k^T$  и  $\varphi_{km}^{TE} = \varphi_m^E - \varphi_k^T$ .

Для потерь энергии электрического поля в поляризованной (по оси 3) пьезокерамике получим выражение

$$p = \frac{\omega}{2} (\mathcal{E} + \Pi + C), \tag{2}$$

а также уравнение для потерь энергии механического поля

$$C = M + \Pi - R, \tag{3}$$

откуда

$$p = \frac{\omega}{2} (\mathcal{E} + M + 2\Pi - R),$$

где  $R = \text{Im} \nabla (\vec{U}^* T)$ ;  $M = S'_{11} (\bar{T}_1^2 + \bar{T}_2^2 + 2\bar{T}_6^2) + S'_{33} \bar{T}_3^2 + S'_{44} (\bar{T}_4^2 + \bar{T}_5^2) + 2S'_{12} (\bar{T}_1 \bar{T}_2 \cos \varphi_{12}^T - \bar{T}_6^2) + 2S'_{13} \bar{T}_3 (\bar{T}_1 \cos \varphi_{13}^T + \bar{T}_2 \cos \varphi_{23}^T)$ ;  $\Pi = \bar{E}_3 [d'_{31} (T_1 \cos \varphi_{13}^{TE} + \bar{T}_2 \cos \varphi_{23}^{TE}) + d'_{33} \bar{T}_3 \cos \varphi_{33}^{TE}] + d'_{15} (\bar{T}_4 \bar{E}_2 \cos \varphi_{42}^{TE} + \bar{T}_5 \bar{E}_1 \cos \varphi_{51}^{TE})$ ;  $\mathcal{E} = e''_{11} (\bar{E}_1^2 + \bar{E}_2^2) + e''_{33} \bar{E}_3^2$ ;  $C = \bar{E}_3 [d'_{31} (\bar{T}_1 \sin \varphi_{13}^{TE} + \bar{T}_2 \sin \varphi_{23}^{TE}) + d'_{33} \bar{T}_3 \sin \varphi_{33}^{TE}] + d'_{15} (\bar{T}_4 \bar{E}_2 \sin \varphi_{42}^{TE} + \bar{T}_5 \bar{E}_1 \sin \varphi_{51}^{TE})$ .

Таким образом, необратимые локальные потери энергии источника электрического возбуждения (2) имеют три составляющих: электрические потери  $\mathcal{E}$ , определяемые только  $e''_{mi}$  и  $E_m$ ; пьезоэлектрические потери электрического поля  $\Pi$  и дополнительную часть  $C$ , отдаваемую механическому полю. Последняя составляющая (3) разделяется на механические потери  $M$ , определяемые только  $S'_{ik}$  и  $T_k$ , пьезоэлектрические потери механического поля  $\Pi$  и на величину, характеризующую необратимую передачу механической энергии за пределы элементарного объема  $R$ . Таким образом

$$p = \frac{\omega}{2} [\mathcal{W} - \text{Im} \nabla (\vec{U}^* T)], \tag{4}$$

где  $\mathcal{W} = \mathcal{E} + M + 2\Pi$  — тепловые потери.

В силу отмеченного выше свойства потока механической энергии

$$P = \frac{\omega}{2} \int_{\Omega} \mathcal{W} d\Omega.$$

Как видно из (2) и (3), пьезоэлектрическая составляющая  $\Pi$  характеризует потери при электромеханическом (за счет пьезоэффекта) преобразовании энергии из электрической в механическую и обратно.

Следует отметить, что в общем случае влияние мнимой части пьезомодуля на диссипацию энергии проявляется не только в возникновении дополнительной компоненты  $\Pi$ , но помимо

этого величина  $d''_{mi}$  входит в выражения для механических и диэлектрических потерь через зависимость от  $d''_{mi}$  полей  $T$  и  $E$ . Последнее наиболее существенно для жесткой моды колебаний [2] ввиду большой связанности электроупругого поля. В рассматриваемом ниже примере мягкой моды колебаний ввиду  $d''_{mi} \ll d'_{mi}$

$$\bar{E} = \text{const} (d''_{mi}); \quad \bar{T} \sim 1 + (d''_{mi}/d'_{mi})^2 \approx \text{const} (d''_{mi}).$$

В этом случае выражение для энергетических потерь содержит только дополнительную компоненту  $\Pi$ , линейную по  $d''_{mi}$ .

Рассмотрим пьезокерамический резонатор в виде стержня, поляризованного по толщине  $h$  и совершающего колебания вдоль длины  $l$  (мягкая мода колебаний [2]). Условие  $l \gg a \gg h$  (рис. 1) обеспечивает однородность электрического поля:

$$\vec{E} = E_3 = V/h,$$

где  $V$  — напряжение источника возбуждения.

Согласно [7]

$$T \equiv T_1 = \frac{d_{31}}{S_{11}^E} E_3 \left( \frac{\cos kx}{\cos kl/2} - 1 \right); \quad \vec{U} \equiv U_1 = d_{31} E_3 \frac{\sin kx}{k \cos kl/2},$$

где  $k^2 = \rho \omega^2 S_{11}^E$ .

Константы представляются в комплексном виде:

$$S_{11}^E = S (1 - i/Q); \quad e_{33}^T = \varepsilon (1 - i\delta); \quad d_{31} = d (1 - i\gamma).$$

Для приведенных величин потерь источника  $\bar{p} = 2\rho/\omega \bar{E}_3^2 \varepsilon$ ,

где  $\rho = \frac{\omega}{2} E_3 \text{Im} D_3^*$ , тепловых потерь  $\bar{W} = \mathcal{W}/\bar{E}_3^2 \varepsilon$  и необратимого потока энергии  $\bar{R} = R/\bar{E}_3^2 \varepsilon$  получим:

$$\bar{p} = \delta - k_{31}^2 (1 - \gamma^2) \text{Im} r + 2\gamma k_{31}^2 \text{Re} r; \tag{5}$$

$$\bar{R} = k_{31}^2 (1 + \gamma^2) m \text{Im} r; \tag{6}$$

$$\bar{W} = \bar{p} + \bar{R}, \tag{7}$$

где

$$r = r(\bar{x}, \chi, Q) = (\cos B\bar{x}/\cos B - 1)/(1 - i/Q);$$

$$m = m(\bar{x}, \chi, Q) = |\cos B\bar{x}|^2 / |\cos B|^2;$$

$$B = (1 + \chi) (1 - i/Q)^{1/2} \pi/2; \quad \bar{x} = 2x/l; \quad \bar{x} \in [-1; 1];$$

$\chi = (f - f_0)/f_0$  — расстройка относительно резонансной частоты  $f_0 = 1/2l(\rho S)^{1/2}$ ;  $k_{31} = (d^2/\varepsilon S)^{1/2}$  — коэффициент электромеханической связи.

В силу симметрии (5) — (7) по  $\bar{x}$  рассмотрен интервал  $\bar{x} \in [0; 1]$ . Для расчета на ЭВМ выражений (5) — (7) в окрестности основного резонанса взяты значения  $Q=130$ ;  $k_{31}=0,34$ ;  $\delta=0,02$ , близкие к параметрам пьезокерамики ЦТСНВ-1.

На рис. 2, а показана зависимость  $\bar{p}(\bar{x}, \chi)$  при максимальном допустимом значении тангенса угла пьезоэлектрических потерь  $\gamma = \gamma_0 = (\delta/k_{31}^2 Q)^{1/2}$  [4 и 8]. Характер зависимости  $\bar{p}(\bar{x}, \chi = \text{const})$  от координаты  $\bar{x}$  является монотонным. На торце резонатора ( $\bar{x}=1$ ) в силу отсутствия механических напряжений потери источника чисто диэлектрические  $\delta$ , а в центре ( $\bar{x}=0$ )

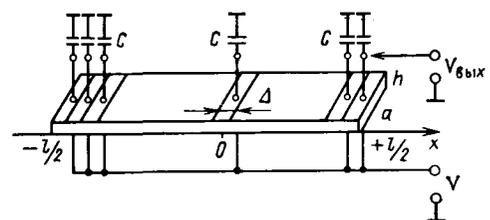


Рис. 1. Схема измерения локальной проводимости стержневого резонатора

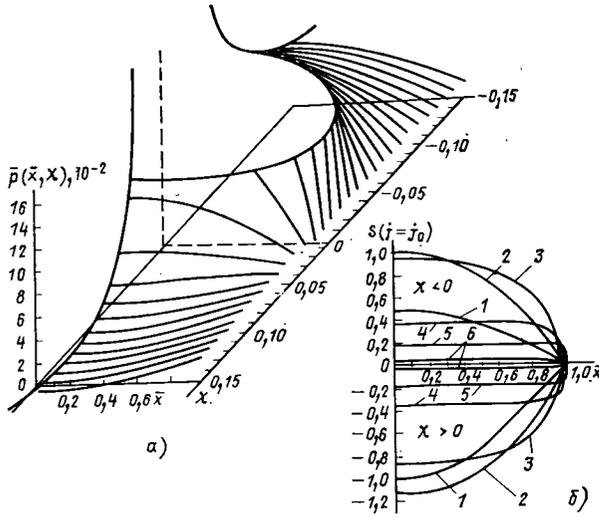


Рис. 2. Распределение локальных потерь энергии источника возбуждения (а) при  $\gamma = \gamma_0$ ,  $\bar{p}(\bar{x} = 0, \chi = 0) = 19,13$  и зависимость распределения относительного вклада пьезоэлектрической составляющей (б) в потери энергии источника  $S(\gamma) \approx S(\gamma = \gamma_0) \gamma / \gamma_0$  от расстройки  $|\chi|$ : 1 — 0,3; 2 — 0,15; 3 — 0,06; 4 — 0,02; 5 — 0,01; 6 — 0,001

источника в центре резонатора. Из (8) имеем

$$\min \bar{p}(0) = \delta \left[ 1 - \frac{4}{\pi} \left( \frac{\gamma}{\gamma_0} \right)^2 - \frac{0,08}{\tau^{1/2}} \frac{\gamma}{\gamma_0} - \frac{0,11}{\tau} + \dots \right], \quad (9)$$

где  $\tau = Q\delta/k_{31}^2$ .

Учитывая, что для пьезокерамики  $\tau \gg 1$  [8]

$$\min \bar{p}(0) \approx \delta \left[ 1 - \frac{4}{\pi} \left( \frac{\gamma}{\gamma_0} \right)^2 \right].$$

Согласно [4] из условия положительности тепловых потерь при произвольном электроупругом поле вытекает, что  $|\gamma| \leq \gamma_0$  [8]. Отсюда следует, что в центральной области резонатора потери энергии источника могут быть отрицательными вплоть до  $\delta(1 - 4/\pi) \approx -0,273 \delta$  [по (9) соответственно  $-0,295 \delta$ , что хорошо согласуется с данными точного расчета на ЭВМ]. Это означает, что, как следует из (4), часть механической энергии, втекающей в центральную область резонатора, расходуется на тепловые потери, а остальная передается источнику возбуждения, который оказывается нагруженным на отрицательную динамическую проводимость центральной зоны. При этом в окрестности расстройки  $\chi_1$  [при  $\gamma = \pm \gamma_0$   $\chi_1 \approx k_{31}/2(Q\delta)^{1/2} \approx \chi_1$ ] ввод энергии источником возбуждения осуществляется через торцевые области резонатора.

Особо следует отметить следующее. Согласно [4] помимо условия  $|\gamma| \leq \gamma_0$  должно выполняться и  $(\gamma/\gamma_0)^2 \leq \frac{1}{2} (1 + S'_{12}/S'_{11})$ .

В [4] для пьезокерамики PZT 65/35 экспериментально установлено, что  $S'_{11}/S'_{11} \approx S'_{12}/S'_{12}$ . Тогда  $|\gamma| \leq \gamma_0 (1 - \mu)^{1/2} / \sqrt{2} \approx \gamma_0$ ,

где  $\mu = -S'_{12}/S'_{11}$  — коэффициент Пуассона, и для встречающихся на практике значений  $\mu = 0,2 \div 0,4$  величина  $|\gamma| \leq (0,63 \div 0,55) \gamma_0$ .

В то же время согласно модели [6], описывающей диссипацию энергии в пьезокерамике механизмом демпфированного движения стенок 90-градусных доменов,  $|\gamma| = \gamma_0 f(v_0)$ , где  $v_0$  — параметр углового распределения доменов  $90^\circ \leq v_0 \leq 180^\circ$ . Отсюда следует  $|\gamma| \leq 0,85 \gamma_0$  при  $\min v_0 = 90^\circ$ . В частности, получим  $\gamma = 0,65 \gamma_0$ , исходя из экспериментально определенного минимального для пьезокерамики значения  $v_0 = 105^\circ$  [6]. Заметим, что для выполнения  $\min \bar{p}(0) < 0$  необходимо  $|\gamma| \geq 0,886 \gamma_0$ . Исходя из полученных выше ограничений на возможные значения  $\gamma$ , следует, что условие  $\min \bar{p}(0) < 0$  для стержневого резонатора в режиме слабого поля нереализуемо. Отметим, однако, что в режиме сильного поля согласно экспериментальным данным [9] возможно  $\gamma > \gamma_0$ .

На рис. 2, б показано распределение относительного вклада пьезоэлектрической составляющей потерь в потери энергии источника  $S(\gamma) = \bar{p}(\gamma) / \bar{p}(\gamma = 0) - 1$ , причем в силу линейности (5) по  $\gamma$  [пренебрегая малой добавкой  $\gamma^2$  к 1 в выражении (5)] при произвольном  $\gamma$  имеем  $S(\gamma) \approx S(\gamma = \gamma_0) \gamma / \gamma_0$ . Максимальный вклад пьезоэлектрической составляющей наблюдается в центре резонатора  $\bar{x} = 0$  при расстройках  $\pm \chi_1$  [8]. Вне этих частот распределение вклада пьезоэлектрических потерь приближается к равномерному, в частности  $S(\gamma) = 0$  по всему объему резонатора на частоте резонанса  $\chi = 0$  [8].

На рис. 3 приведено распределение необратимого потока энергии  $\bar{R}(\bar{x}, \chi)$  (2) по объему резонатора в зависимости от резонансной расстройки  $\chi$ . Как отмечалось выше  $\int_0^1 \bar{R}(\bar{x}) d\bar{x} = 0$ .

В связи с этим  $\bar{R}(\bar{x})$  при фиксированном  $\chi$  имеет положительный экстремум в центре резонатора  $\max \bar{R}(\bar{x} = 0) = \frac{4}{\pi} \left( \frac{4}{\pi} - 1 \right) k_{31}^2 Q$

$\chi = 0$ , проходит через нуль в точке  $\bar{x}_0 = \frac{2}{\pi} \arccos \frac{\pi}{4} \approx 0,425$ , имеет отрицательный экстремум при  $\bar{x}_1 = \frac{2}{\pi} \arccos \frac{\pi}{8} \approx 0,743 \times$

$\times \left[ \min \bar{R}(\bar{x}_1) = -\frac{1}{4} k_{31}^2 Q \text{ при } \chi = 0 \right]$  и далее стремится к нулю на торце резонатора  $\bar{x} = 1$ . Значения  $\bar{R} > 0$  соответствуют необратимому притоку энергии (в центральную область), а  $\bar{R} < 0$  — необратимому оттоку энергии (из торцевой области резонатора). Не-

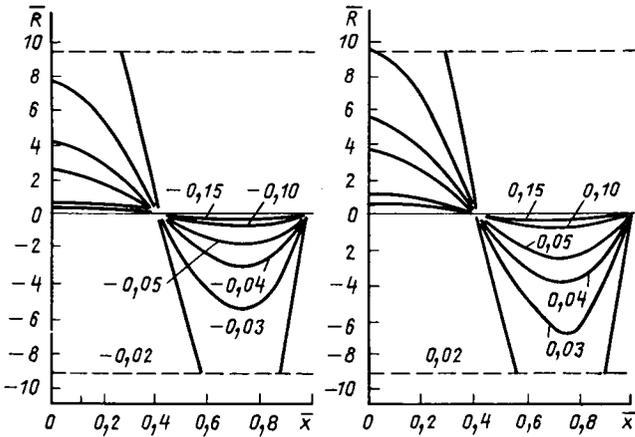


Рис. 3. Распределение необратимого потока энергии  $\bar{R}(\bar{x}, \chi)$  по объему резонатора в зависимости от расстройки  $\chi$

наблюдаются два экстремума: первый соответствует резонансу  $\chi_0 = 0$ , а второй — расстройке  $\chi_1 = 0,13$ , где  $\min \bar{p} = -0,298 \delta$ .

Особенности поведения  $\bar{p}(\bar{x}, \chi)$  в зависимости от частоты наиболее выражены в центре резонатора, где обозначим  $\bar{p}(\bar{x} = 0, \chi) \equiv \bar{p}(0)$ . Используя разложение в окрестности резонанса входящих в (5) функций при  $\bar{x} = 0$  по малым параметрам частотной расстройки  $\chi$  и обратных добротностей  $\alpha = \{1/Q, \gamma\}$  с точностью до  $\chi^3$  и  $\alpha^2$ , получим [8]:

$$\bar{p}(0) = \delta - k_{31}^2 \left( 2\gamma - \frac{1}{Q} \right) + \frac{a k_{31}^2}{Q} \frac{1 - G\chi - N\chi^2 + \dots}{\chi^2 + \frac{1}{4Q^2} + \frac{3\chi}{4Q^2} + \dots}, \quad (8)$$

где  $a = 1/\pi \approx 0,318$ ;  $N = \pi^2/8 \approx 1,23$ ; значение величины  $G = 2Q(2\gamma - 3/2Q)$  порядка единицы [малыми членами в (8) пренебрегаем]. Выражение (8) имеет экстремумы при  $\chi_0 = -(3 + G)/8Q^2 \approx 0$ , что соответствует максимуму потерь на резонансной частоте —  $\max \bar{p}(0) = 4k_{31}^2 Q/\pi$ , и при расстройке  $\chi_1 = 1/Q(2\gamma - 3/2Q)$ , соответствующей минимуму потерь энергии

обратимый поток энергии не зависит от пьезоэлектрических потерь [пренебрегаемая малой добавкой  $\gamma^2$  к 1 в выражении (6)].

На рис. 4, а показано распределение по объему резонатора тепловых потерь  $\bar{W}(\bar{x}, \chi)$  в зависимости от резонансной расстройки  $\chi$  при  $\gamma = \gamma_0$ . Согласно (7) в элементарном объеме резонатора тепловые потери отличаются от потерь источника на величину необратимого потока механической энергии. При допустимых значениях  $|\gamma| \leq \gamma_0$  [4] величина  $\bar{W} \geq 0$  при произвольном электроупругом поле. Неотрицательность  $\bar{W}(\bar{x}=0, \chi = \chi_1)$  при отрицательных (9) потерях источника обеспечивается необратимым притоком механической энергии в центральную область резонатора. При приближении к резонансу область минимума по  $\bar{x}$  тепловых потерь смещается из центра к торцу резонатора, исчезая на частотах  $\chi \leq 0$ . В точках  $x_0 \approx 0,425$  и  $x=1$  в силу свойств  $\bar{R}(\bar{x}, \chi)$  тепловые потери равны потерям источника возбуждения.

В резонансе в центре резонатора величина  $\bar{W}(\bar{x}=0, \chi = 0) = \frac{16}{\pi^2} k_{31}^2 Q$ , 78,5% ( $4/\pi$ ) которой составляют потери источника, а 21,5% ( $1-4/\pi$ ) — необратимый приток механической энергии. На рис. 4, б показано распределение относительного вклада пьезоэлектрической составляющей потерь в локальные тепловые потери  $L(\gamma) = \bar{W}(\gamma)/\bar{W}(\gamma=0) - 1$ , причем в силу линейности (7) по  $\gamma$  (пренебрегая малой добавкой  $\gamma^2$  к 1) при произвольном  $\gamma L(\gamma) \approx L(\gamma = \gamma_0)\gamma/\gamma_0$ . Величина  $|L(\gamma)| \leq 1$  при  $|\gamma| \leq \gamma_0$ , т. е. пьезоэлектрические потери не могут превышать по модулю сумму диэлектрических и механических тепловых потерь. При расстройках  $\pm \chi_1$  экстремум  $L(\gamma)$  находится в центре резонатора. При приближении к резонансу ( $\chi=0$ ) экстремум  $L(\gamma)$  перемещается к торцу резонатора, а на частоте резонанса  $L(\gamma) = 0$  по всему объему [8].

Согласно (9) потери энергии источника в центре резонатора в окрестности расстройки  $\chi_1 = 1/Q$  ( $2\gamma - 3/2Q$ ) при  $0 < \gamma \leq \gamma_0$  должны быть меньше диэлектрических  $\delta$ . Для экспериментального подтверждения обнаруженного эффекта измерялось распределение действительной части проводимости (потерь энергии источника) по длине резонатора. На рис. 1 приведена схема измерения локальной проводимости стержневого резонатора размерами  $90 \times 9 \times 5$  мм с разделенными электродами шириной  $\Delta = l/21$ . Действительная часть проводимости каждого участка определялась синхронным детектированием [10] (с помощью стробоскопического вольтметра В9-5) напряжения  $V_{\text{вых}}$  с емкости  $C(1 - i\delta_c)$ , подключенной последовательно с разделенным электродом. Сопротивление  $[\omega C(1 - i\delta_c)]^{-1}$  выбиралось достаточно малым [8] по сравнению с комплексным сопротивлением измеряемого участка резонатора.

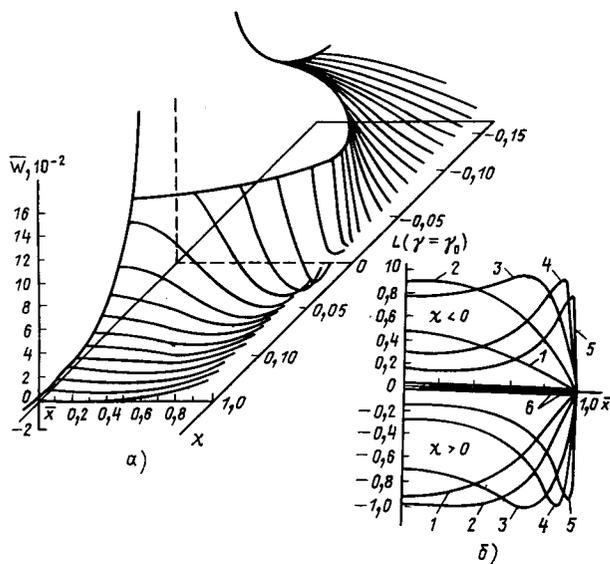


Рис. 4. Распределение тепловых потерь энергии (а) при  $\gamma = \gamma_0$   $\bar{W}(\bar{x}=0, \chi=0) = 24,27$  и зависимость распределения относительного вклада пьезоэлектрической составляющей (б) в тепловые потери энергии  $L(\gamma) \approx L(\gamma = \gamma_0)\gamma/\gamma_0$  от расстройки  $|\chi|$ : 1 — 0,3; 2 — 0,15; 3 — 0,06; 4 — 0,02; 5 — 0,01; 6 — 0,001

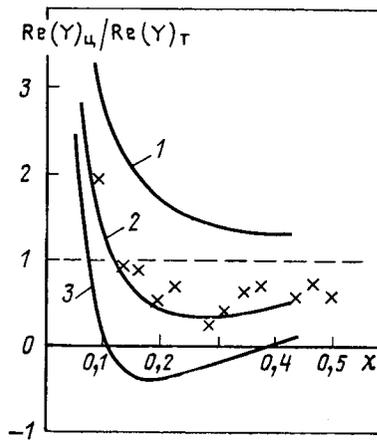


Рис. 5. Частотная зависимость отношения действительных частей проводимостей центральной и торцевой зон резонатора из ЦТСНВ-1 ( $f_0 = 16,763$  кГц):  $\times$  — экспериментальные данные; — — — — — теоретические кривые при  $Q=130$ ;  $k_{31}=0,34$ ;  $\delta = 0,012$  и 1 —  $\gamma=0$ ; 2 —  $\gamma=0,7\gamma_0$ ; 3 —  $\gamma=\gamma_0$

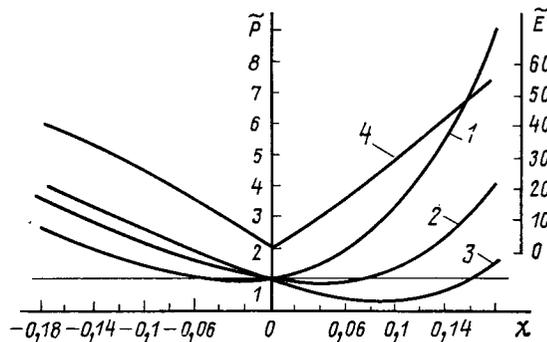


Рис. 6. Частотная зависимость мощности потерь источника  $\tilde{p}$  при условии  $U_1(\bar{x}=1) = \text{const}(\chi)$ : 1 —  $\gamma=0$ ; 2 —  $\gamma=0,65\gamma_0$ ; 3 —  $\gamma=\gamma_0$ ; кривая 4 — напряженность возбуждающего поля  $E$ , обеспечивающая постоянство амплитуды колебаний торца ( $Q=130, k_{31}=0,34, \delta=0,02$ )

На рис. 5 показана зависимость от резонансной расстройки отношения действительной части проводимости центральной области  $\text{Re}(Y)_u$  к действительной части проводимости торцевой области  $\text{Re}(Y)_t$  при  $-l/2 - \Delta < x < l/2$ . На резонаторе из пьезокерамики ЦТСНВ-1 с параметрами  $Q = 145, k_{31} = 0,343, \delta = 0,01$  путем измерения сопротивления на антирезонансе [9] получено  $\gamma = 0,63\gamma_0$ , где  $\gamma_0 = 0,024$ . Согласно экспериментальным данным (рис. 5) в центральной области резонатора на частотах, соответствующих расстройкам  $\chi = 0,13 \div 0,5$ , потери источника меньше диэлектрических, что подтверждает теоретические выводы.

Одним из технических применений пьезокерамического резонатора являются устройства механических перемещений. Рис. 6 характеризует влияние пьезоэлектрической составляющей потерь на энергетическую эффективность амплитуды колебаний торца  $|U_1(\bar{x}=1)| = E \frac{l}{2} \left| \frac{\text{tg} kl/2}{d_{31} kl/2} \right|$ . При  $\gamma=0$  эффек-

тивность перемещений незначительно выше резонансной при отрицательных расстройках. При увеличении  $\gamma$  вплоть до  $\gamma_0$  энергетическая эффективность больше резонансной более чем в 3 раза при положительных расстройках, включающих и частоту антирезонанса. Последний пример указывает на то, что в техническом приложении учет пьезоэлектрической составляющей потерь позволит оптимизировать режим эксплуатации резонаторов.

Потери энергии источника в центре дискового резонатора при радиальных колебаниях определяются также соотношениями (8), (9) при замене величины  $1/\mu$  выражением  $x_0(1+\mu)/4J_1 \times (x_0) x_0^2 + \mu^2 - 1$  (равном 0,3548 при  $\mu = 0,32$ ),  $k_{31}$  на  $k_p$ ,  $\gamma_0$  на  $\bar{\gamma}_0$  (при условии  $S'_{11}/S'_{11} \approx S'_{12}/S'_{12}$  [4]), где  $x_0$  — корень частотного уравнения  $xJ_0(x) = (1-\mu)J_1(x)$ ,  $J_0(x)$  — функции Бесселя. Тогда из (9) при  $\mu = 0,32$   $\min \bar{p}(0) = \delta [1 - 1,42(\bar{\gamma}/\bar{\gamma}_0)^2 + \dots]$ , откуда  $\min \bar{p}(0) < 0$  реализуется при  $\bar{\gamma} \geq 0,84 \bar{\gamma}_0 = 0,49 \gamma_0$ , т. е. на дисковом резонаторе при реальных значениях  $\bar{\gamma}$  возможна отрицательная динамическая проводимость (отрицательные потери источника) центральной зоны в окрестности расстройки  $\chi_1$ . Предсказанный теоретически эффект нашел экспериментальное подтверждение.

Случай жесткой моды [2], обладающей большей связанностью электроупругого поля, требует отдельного рассмотрения. Отметим, что в отличие от случая мягкой моды пьезоэлектрическая составляющая потерь при жесткой моде колебаний в резонансе не равна нулю и существенно изменяет распределение энергетических потерь по объему резонатора.

**Выводы.** 1. Получены в общем виде соотношения для баланса локальных потерь энергии в пьезокерамическом резонаторе при учете диссипативных свойств пьезокерамики путем представления механических, диэлектрических и пьезоэлектрических констант в комплексном виде.

2. В случае мягкой моды колебаний для примера стержневого резонатора проведен расчет распределения по объему локальных потерь источника возбуждения и тепловых потерь. Показана возможность реализации отрицательной динамической проводимости центральной зоны резонатора при положительных тепловых потерях.

3. Экспериментально установлено, что при определенных частотах в окрестности основного резонанса локальные потери меньше диэлектрических, что непосредственно связано с наличием у пьезомодуля мнимой части.

4. Наличие пьезоэлектрической компоненты потерь энергии (за счет мнимой части пьезомодуля) в целом для резонатора изменяет энергетическую эффективность резонансных характеристик (амплитуды перемещения торца и др.).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Улитко А. Ф. К теории электромеханического преобразования энергии в неравномерно деформируемых пьезокерамических телах. — Прикладная механика, 1977, т. 13, № 10, с. 115—123.
2. Стандарт МЭК. Публикация 483, 1978.
3. Auld B. A. Acoustic fields and waves in solids. — Stanford University, 1973, vol. 1.
4. Holland R., Eer Nisse E. P. Design of resonant piezoelectric devices. — M. J. T. Press, Cambridge, 1969.
5. Yamaguchi T., Hamano K. Interferometric method of measuring complex piezoelectric constants of crystals in a frequency range up to about 50 kHz. — Japanese J. Appl. Phys., 1979, vol. 18, N 5.
6. Arlt G., Dederichs H. Complex elastic, dielectric and piezoelectric constants by domain wall damping in ferroelectric ceramics. — Ferroelectrics, 1980, vol. 29.
7. Физическая акустика. Методы и приборы ультразвуковых исследований/Под ред. У. Мэсона. — М.: Мир, 1966, т. 1, ч. А.
8. Межеричкий А. В. Потери энергии в пьезокерамике при электрическом возбуждении. — Электричество, 1984, № 10.
9. Бондаренко А. А., Карась Н. И., Куценко Г. В. Потери энергии в пьезокерамике и методы их учета при определении амплитуд колебаний элементов конструкций. — В кн.: Рассеяние энергии при колебаниях механических систем. — Киев: Наукова думка, 1980, с. 337—344.
10. Межеричкий А. В. Простой метод измерения механической добротности пьезокерамики. — Электронная техника, 1982, сер. 6, в. 5 (166).

[24.09.85]



### ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

Редакция журнала «Электричество» информирует Вас о книгах, выпускаемых Энергоатомиздатом в 1987 г.

С аннотациями на книги можно ознакомиться в Плате выпуска литературы издательства на 1987 г., который поступает во все книжные магазины, распространяющие техническую литературу.

Ниже приводится перечень книг с указанием номера позиции по Плану.

Цены даны ориентировочно.

#### КИБЕРНЕТИКА. ИНФОРМАТИКА

##### Кибернетика

1. Колесников А. А. Исследовательская оптимизация нелинейных агрегированных систем управления. — 40 к.
106. Коршунов Ю. М. Математические основы кибернетики: Учеб. пособие для вузов. — 1 р. 40 к.
2. Кузнецов П. И., Пчелинцев Л. А. Последовательное обучение систем диагностики. — 65 к.
105. Кузнецов О. П., Адельсон-Вельский Г. М. Дискретная математика для инженера. — 3-е изд., перераб. и доп. — 1 р. 70 к.
103. Методы анализа и синтеза структур управляющих систем / Б. Г. Волик, Б. Б. Буянов, Н. В. Лубков и др. — (Применение вычислительных машин в исследованиях и управлении производством). — 1 р. 30 к.
104. Сильверстов А. Н., Чинаев П. И. Идентификация и оптимизация автоматических систем. — 70 к.
3. Шахтарин В. И. Квазигармонический метод и его применение к анализу нелинейных фазовых систем. — 55 к.

##### Информатика

107. Средства информационной техники: Справочник / Г. Т. Артамонов, Л. И. Британ, В. М. Голубков и др. — 2-е изд., перераб. и доп. — 1 р. 70 к.
4. Темников Ф. Е. Методы и модели развертывающих систем. — 2-е изд., перераб. и доп. — 70 к.

УДК 621.311.016(049.3)

## Экспериментальные исследования режимов энергосистем<sup>1</sup>. — М.: Энергоатомиздат, 1985, 448 с. с илл.

Рассматриваемая книга является по своему содержанию и построению излагаемого в ней материала уникальной работой, не имеющей аналогов в отечественной и зарубежной литературе. Приведен обширный материал, полученный в результате испытаний, проведенных авторами, или (в меньшей степени) — на основе литературных данных. Приведенные в книге сведения будут исключительно полезны для инженеров и научных работников, занимающихся вопросами проектирования электрических систем и их эксплуатации. Книга имеет очень большое познавательное значение и может с успехом использоваться в качестве учебной литературы.

Книга содержит предисловие, введение, девять глав и список литературы, состоящий из 148 наименований.

**Глава 1.** «Характеристики агрегатов электростанций» состоит из двух разделов. В первом рассмотрены статические и динамические характеристики турбоагрегатов по частоте, втором — управляемость агрегатов электростанций при отклонениях частоты. Эти разделы относятся к станционным испытаниям, в которых рассматриваются разные турбины и котлы.

Наибольшую ценность в данной главе представляет анализ применимости, необходимый для правильного учета действия того или иного агрегата в системе противоаварийной автоматики. Очевидно, что работа в этом направлении имеет важное значение и будет продолжаться.

**Глава 2.** «Характеристики нагрузки энергосистем» имеет существенное значение и содержит интересные вопросы, в особенности — динамической устойчивости нагрузки. К сожалению, в табл. 2.2 приведены данные испытаний, проводившихся до 1970 г. Не исключено, что в настоящее время появились узлы нагрузки с другими характеристиками.

Здесь авторам можно было бы рекомендовать использовать критерильные методы для распространения результатов предыдущих испытаний на узлы нагрузки с другим составом оборудования и его параметров.

**Глава 3.** «Характеристики энергосистем по частоте», к сожалению, не содержит острого вопроса о снижении качества электроэнергии по частоте. Из результатов опытов можно было бы сделать ряд важных выводов, в частности, опровергающих высказываемую некоторыми специалистами точку зрения о необходимости деления системы на части, работающие с различной частотой.

**Глава 4.** «Колебания нагрузки и обменной мощности энергосистем» представляет значительный интерес, но теоретические соображения не всегда достаточно полно увязаны с экспериментальными данными.

**Глава 5.** «Статическая устойчивость энергосистем». Здесь представляются несколько растянутыми раздел 5.3 и часть раздела 5.4, где чрезмерно подробно излагается технология эксперимента. Это же замечание в определенной мере следует отнести и к разделу 5.5. Раздел 5.7 должен был бы содержать более полный анализ, так как довольно подробное описание положительного трактомого эксперимента с полувольтной электропередачей может вызвать у читателя представление о реальности осуществления таких линий, хотя авторы нигде не высказывают своей позиции по этому вопросу. Кстати, эксперимент был не вполне чистым, так как опытная полувольтная линия имела очень большое по сравнению с реальным отношение  $l/x$ , что приводило к искажению процессов в ней. Это следовало указать при анализе опытов.

**Глава 6.** «Синхронная динамическая устойчивость». Описательные разделы 6.1 и 6.2 изложены достаточно ясно. В разделе 6.3 рассмотрены два опыта успешного ОАПВ, но ничего

не сказано о том, насколько совпадают полученные опытные данные с расчетными. С этой точки зрения раздел 6.4, в котором рассмотрено действие БАПВ на электропередаче 750 кВ Западно-Украинская — Альбертирша, выгодно отличается сравнением расчетных и экспериментальных данных. Раздел 6.5 содержит исторически ценные сведения. Раздел 6.6 включает анализ влияния АРВ сильного действия, но параметры АРВ с 1958 г. кардинально изменились, что следовало бы отметить в книге. В описании испытаний системы электрического торможения, представленном как фрагмент возможного мероприятия по повышению динамической устойчивости, не выявлена позиция авторов относительно перспектив использования этого метода.

**Глава 7.** «Асинхронные режимы и результирующая устойчивость». Описанные в ней исследования асинхронных режимов и результирующей устойчивости весьма обстоятельны и интересны, однако авторы не высказывают достаточно ясно своей точки зрения относительно тенденций к отказу от этих режимов, проявляющихся в настоящее время.

**Глава 8.** «Экспериментальная оценка эффективности противоаварийных мероприятий для повышения устойчивости» в целом изложена очень хорошо и представляет большой интерес. В итоге главы было бы целесообразно привести точку зрения авторов на перспективы развития противоаварийной автоматики энергосистем, вытекающие из результатов экспериментов.

**Глава 9.** «Формирование ЕС СССР. Создание энергообъединения стран — членов СЭВ» недостаточно освещает трудности, возникшие при объединении на параллельную работу энергосистем разных стран, в частности, обусловленные нестабильностью частоты.

Оценивая содержание книги в целом, заметим прежде всего, что в ней описан целый ряд действительно уникальных экспериментальных исследований, не проводившихся до сих пор в таком объеме и с такой глубиной в мировой практике.

В книге хорошо сочетаются вопросы теории и практики, хотя, как следует из приведенных ниже замечаний, это не всегда явно выдержано. Вместе с тем в книге имеется обширный материал, раскрывающий, например, причину таких явлений, как системный электромеханический резонанс (гл. 7), при котором асинхронный режим на Волжской ГЭС им. XXII съезда КПСС вызвал большие колебания и даже создавал угрозу нарушения устойчивости электропередачи Куйбышев — Урал. Опыты авторов позволили выявить и далее объяснить такое сложное явление.

Именно опыты на мощных электропередачах, подтвердившие результаты лабораторных исследований на моделях, позволили уверенно указать роль и место в энергосистемах пропорционального и сильного регулирования возбуждения, а также выявили необходимость его тщательной настройки. Пренебрежение этим обстоятельством специалистами электрических станций в дальнейшем стало часто приводить к неудовлетворительной работе регулирования. Эксперименты с «полувольтной линией» выявили возможность существования таких режимов и таким образом подтвердили теорию практикой. Проведенный в свое время авторами книги анализ недостаточной управляемости блочных электростанций имел большое практическое значение для развития электрических систем. Можно было бы еще и еще перечислять достоинства рецензируемой книги и отмечать ее значение для развития науки и техники, однако, ограничиваясь в этом плане сказанным, перейдем к некоторым недостаткам и соответственно пожеланиям с точки зрения второго издания книги.

Значение книги, несомненно, было бы еще большим, если бы интересные результаты испытаний, проведенных в натуре,

<sup>1</sup> Авторы книги: Горбунова Л. М., Портной М. Г., Рабинович Р. С., Савалов С. А., Тимченко В. Ф. Под ред. С. А. Савалова

были бы критически сопоставлены с результатами вычислений и экспериментов на различных моделях.

Целесообразно было бы обработку всех полученных результатов и их сопоставление между собой проводить в критериальной форме, исходя из тех возможностей, которые открывает теория подобия. Однако авторы книги не используют возможности обработки результатов с помощью критериальных соотношений и распространения единичного результата опыта на достаточно широкий класс явлений. То же самое относится и к сопоставлению ряда результатов, полученных в различных опытах, а также ранее — при исследованиях на физических моделях регуляторов возбуждения, режимов дальних передач, самовозбуждения\* и многих других явлений, происходящих в электрических системах. В книге не проводится сопоставление этих результатов с результатами, полученными позднее в натуральных экспериментах, хотя в свое время такие сопоставления делались и публиковались, о чем авторы правильно говорят в предисловии. Этот недостаток в высшей степени интересной книги должен быть устранен в ее последующих изданиях, которые, несомненно, должны появиться в ближайшем будущем, так как очевидно, что книга вызовет столь большой интерес, что ее тираж будет явно недостаточен.

Заметим, что в предисловии к книге упоминается о том, что в ней не освещены некоторые важные, но представляющие интерес для узкого круга специалистов экспериментальные данные. Это естественно, так как объем книги ограничен, и она рассчитана на относительно широкий круг читателей. Тем не менее, представляется важным дать хотя бы библиографию работ, в которых приведены результаты экспериментов, недостаточно отраженные в книге.

Можно полностью согласиться с авторами, когда они говорят, что одной из целей экспериментальных исследований является уточнение на основе опытных данных схем замещения энергосистем, их элементов, параметров и характеристик (с. 270). Однако недостаточность или отсутствие в книге расчетных данных для схем энергосистем, в которых проводился эксперимент, затрудняют выполнение этой задачи.

Так, в ряде случаев даны только названия электропередач. Между тем для использования приведенных в книге экспериментальных данных с целью уточнения математического описания и разработки математической модели, адекватной поставленной задаче, необходимо знать значения параметров системы и режима, оценку погрешности, с которой определены эти параметры, условия проведения эксперимента и т. д. Целесообразно указать хотя бы литературу, где эти данные приведены.

Известно, что на режим системы существенное влияние в ряде случаев оказывают случайные, стохастические факторы. В главе 4 учитывается случайный характер колебаний обменной мощности. Но в целом в книге, как правило, приводятся результаты единичных экспериментов. Возникает вопрос, насколько велика дисперсия воспроизводимости этих экспериментов, насколько велик будет разброс результатов этих экспериментов при их повторении. Там, где проводится сопоставление с расчетными данными, авторы дают результаты единичного эксперимента и единичного расчета (см. например, рис. 6.3 на с. 280, рис. 8.12 на с. 385 и др.) На с. 271 они пишут: «совпа-

дение переходных процессов в опытах и расчетах, полученное для одних и тех же режимов и возмущений, свидетельствует о правильности задания параметров энергосистемы и выбора эквивалентной расчетной схемы». С таким сопоставлением расчетных и экспериментальных данных не всегда можно согласиться, поскольку вследствие влияния стохастических факторов и неизбежной погрешности в определении параметров системы «совпадение» результатов единичного расчета и эксперимента может быть случайным и не обязательно служит гарантией высокой точности математической модели. Необходимо в тексте книги при новом издании сделать соответствующие оговорки.

Описанные в книге эксперименты уникальны и трудоемки. Необходимо хотя бы затронуть вопрос о путях повышения эффективности экспериментальных исследований. Эксперименты должны быть обобщающими, давать не точку при заданных значениях параметров системы, режима, начальных условий, а область в пространстве этих параметров. Для этого необходимо применять методы теории планирования эксперимента и теории подобия и сочетание этих методов.

В книге затрагивается вопрос разработки на основе результатов экспериментов, полученных при определенных схеме и режимах, адекватной математической модели и использования этой модели для прогнозирования поведения системы при других схемах и режимах (с. 272, 297 и др.) Следовало бы дать соответствующие примеры из литературы. Продолжая замечания, касающиеся исходных данных, можно заметить, что в разделе 6.7, посвященном демпфированию синхронных качаний, к сожалению, не дано никаких оценок качества процесса. Каковы частоты, коэффициенты затухания наблюдавшихся в реальных энергосистемах качаний? Проявляются ли в эксплуатации какие-либо требования к параметрам синхронных качаний? Какую опасность представляют для энергосистемы длительные слабозатухающие колебания? Ведь известны случаи, когда при длительных колебаниях (синхронных качаниях) на Южно-Украинской ГРЭС технологическая защита отключала агрегат. Эти данные следует привести более полно с использованием авторами располагаемой такого рода статистикой, представляющей большой интерес для читателей.

Разумеется, все сделанные замечания не меняют данную выше весьма высокую оценку книги. В заключение можно еще раз отметить исключительно большую работу, проделанную авторами книги, и пожелать им дальнейшего развития затронутой ими темы — проведения и анализа экспериментальных исследований режимов энергосистем. Очень хотелось бы, чтобы они при этом расширили постановку задачи и полученные результаты применением теории планирования эксперимента, теории подобия, и, что очень важно, более полным сопоставлением полученных в больших системах результатов с аналитическими расчетами и лабораторными экспериментами. Это делает данную важную работу работой подлинно классической. Скорейшее переиздание книги увеличенным тиражом совершенно необходимо.

**ВЕНИКОВ В. А.**, доктор техн. наук, **ЛИТКЕНС И. В.**, доктор техн. наук **ШТРОБЕЛОВ В. А.**, канд. техн. наук, **СЫРОМЯТНИКОВ С. Ю.**, канд. техн. наук

## Вниманию читателей!

Редакция журнала «Электричество» информирует Вас о книгах, выпускаемых Энергоатомиздатом в 1987 г.

С аннотациями на книги можно ознакомиться в Плате выпуска литературы издательства на 1987 г., который поступает во все книжные магазины, распространяющие техническую литературу.

Ниже приводится перечень книг с указанием номера позиции по Плану.

Цены даны ориентировочно.

### ЭНЕРГЕТИКА

#### Общие вопросы

114. Методы прогнозирования и перспективы развития энергетики социалистических стран/Под ред. Д. Б. Вольфберга. — 3 р. 30 к.

116. Смирнов А. Д., Антипов К. М. Справочная книжка энергетика. — 5-е изд., перераб. и доп. — 2 р. 10 к.

117. Справочник механика энергетического строительства/Е. Г. Гологорский, А. Н. Кравцов, В. Д. Маслов и др. — 2-е изд., перераб. и доп. — 2 р.

115. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент: Пер. с англ. — 2 р.

#### Экономия топлива и электроэнергии

118. Афанасьева Е. И., Тульчин И. К. Снижение расходов электроэнергии в электроустановках зданий. — (Экономия топлива и электроэнергии). — 65 к.

119. Данилов О. Л., Леончик Б. И. Экономия энергии при тепловой сушке — (Экономия топлива и электроэнергии). — 50 к.

120. Дорман Е. И. Энерготехнологические установки с глубоким использованием вторичных энергоресурсов — (Экономия топлива и электроэнергии). — 55 к.

121. Иванов В. С., Соколов В. И. Режимы потребления и качества электроэнергии систем электроснабжения промыш-

ленных предприятий. — (Экономия топлива и электроэнергии). — 1 р. 20 к.

122. Ключников А. Д. Энергетика теплотехнологии и вопросы энергосбережения. — (Экономия топлива и электроэнергии). — 45 к.

123. Кораблев В. П. Экономия электроэнергии в быту. — (Экономия топлива и электроэнергии). — 35 к.

124. Экономия электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах/Ю. Н. Тулуевский, И. Ю. Зинуров, А. Н. Попов, В. С. Галян. — (Экономия топлива и электроэнергии). — 35 к.

### ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

#### Общие вопросы

125. Астафьев В. Е. Комплексная система хозяйствования в условиях научно-технического прогресса. — (Предприятие — самостоятельность и ответственность). — 50 к.

133. Бухаров А. И., Емельянов И. А., Суднов В. П. Средства зарядки аккумуляторов и батарей: Справочник. — 1 р. 20 к.

126. Верховцев О. Г., Лютов К. П. Практические советы мастеру — любителю: Электротехника, электроника. Материалы и их обработка. — 90 к.

132. Вольтинский Б. А., Зейн Е. Н., Шатерников В. Е. Электротехника: Учеб. пособие для вузов. — 1 р. 20 к.

127. Каминский Е. А. Практические приемы чтения схем электроустановок. — 1 р. 60 к.

41. Меерович Э. А., Мейерович Б. Э. Методы релятивистской электродинамики в электротехнике и электрофизике. — 2 р. 90 к.

128. Практика проведения функционально-стоимостного анализа в электротехнической промышленности/Под ред. М. Г. Карпунина. — 1 р. 40 к.

129. Русин А. И. Основы технологии свинцовых аккумуляторов. — 70 к.

130. Харват Т., Берта И. Нейтрализация статического электричества: Пер. с англ. — 60 к.

131. Юськов М. А. Электрооборудование внутривозового транспорта. — (Б-ка электромонтера). — 30 к.

134. Электротехнический справочник: Т. 3. Кн.1/Под общ. ред. В. Г. Герасимова и др. — 7-е изд., перераб. и доп. — 4 р. 60 к.

#### Электрические измерения

135. Векслер М. С., Теплинский А. М. Шунты переменного тока. — 65 к.

136. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. — 2-е изд., перераб. и доп. — 1 р. 30 к.

137. Любимов Л. И., Форсилова И. Д., Шапиро Е. З. Проверка средств электрических измерений. — 2-е изд., перераб. и доп. — 1 р. 20 к.

138. Капиев Р. Э. Измерительно-вычислительные комплексы. — 50 к.

142. Основы метрологии и электрические измерения: Учебник для вузов/Под ред. Е. М. Душина. — 6-е изд., перераб. и доп. — 1 р. 30 к.

42. Панин В. В., Степанов Б. М. Измерение импульсных магнитных и электрических полей. — 50 к.

139. Попов В. С., Желбаков И. Н. Измерение среднеквадратического значения напряжения. — (Электронизмерительные приборы). — 40 к.

140. Скородумов С. А., Обоишев Ю. П., Синцова Л. Г. Измерение параметров магнитных полей при сверхнизких температурах. — 65 к.

141. Тиль Р. Электрические измерения неэлектрических величин: Пер. с нем. — 1 р. 10 к.

143. Федоров А. М., Цыган Н. Я., Мичурин В. И. Артрологическое обеспечение измерений электрических величин: Справочная книга. — 75 к.

#### Техника высоких напряжений

144. Кучинский Г. С., Кизеветтер В. Е., Пинталь Ю. С. Изоляция установок высокого напряжения: Учебник для вузов. — 1 р.

Электротехнические материалы и изделия  
147. Белоруссов Н. И., Саакян А. Е., Яковлева А. И. Электрические кабели и шнуры: Справочник. — 5-е изд., перераб. и доп. — 3 р. 90 к.

145. Бранзбург Е. З., Каменский М. К., Хромченко Г. В. Кабели с пластмассовой изоляцией и муфты для их монтажа. — 45 к.

146. Мессинжик Я. З., Осягин А. А. Силовые кабельные линии для погружных электросистем. — 1 р. 10 к.

148. Справочник по электротехническим материалам/Под ред. Ю. В. Корникова и др. В 3 т. Т. 3. — 3-е изд., перераб. и доп. — 4 р. 30 к.

#### Электрические машины и аппараты

149. Архипцев Ю. Ф., Котеленц Н. Ф. Асинхронные электродвигатели. — 2-е изд., перераб. и доп. — (Б-ка электромонтера). — 35 к.

150. Балагуров В. А., Галтеев Ф. Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. — 1 р. 20 к.

151. Бородулин Ю. В., Гусев В. А., Попов Г. В. Автоматизированное проектирование силовых трансформаторов. — 1 р. 10 к.

152. Вакуумные выключатели в схемах управления электродвигателями/В. А. Воздвиженский, А. Ф. Гончаров, В. Б. Козлов и др. — 1 р.

153. Дзекцер Н. Н., Висленев Ю. С. Многомерные контактные соединения. — 45 к.

154. Каасик П. Ю., Пухов А. А. Синхронные индукторные электродвигатели малой мощности. — 65 к.

155. Кравчик А. Э., Стрельбицкий Э. К., Шлаф М. М. Выбор и применение асинхронных двигателей. — 40 к.

156. Кукеков Г. А., Фролов В. Я. Переходные процессы в контактно-тиристорных аппаратах. — 55 к.

157. Намитоков К. К., Ильина Н. А., Шилковский И. Г. Аппараты для защиты полупроводниковых устройств. — 1 р.

158. Поклонов С. В. Асинхронные двигатели герметических электронасосов. — 35 к.

159. Соколов Р. И. Эксплуатация и ремонт крупных вертикальных электродвигателей. — (Б-ка электромонтера). — 30 к.

164. Справочник по расчету и конструированию контактных силовых электрических аппаратов/Под ред. В. В. Афанасьева. — 1 р. 50 к.

163. Справочник по ремонту и модернизации гидрогенераторов/Под ред. В. М. Надточего, Я. С. Уринцева. — 1 р. 50 к.

160. Такаси К. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ. — 1 р. 30 к.

43. Тепловые трубы в электрических машинах/Под ред. В. М. Петрова. — 55 к.

162. Технология электроаппаратостроения: Учеб. пособие для вузов/Под ред. Ю. А. Филиппова. — 1 р. 10 к.

161. Хуторецкий Г. М., Токов М. И., Толвинская Е. В. Проектирование турбогенераторов. — 1 р. 10 к.

44. Ударные униполярные генераторы/В. А. Глухих, Г. А. Баранов, Б. Г. Карасев, В. В. Харитонов. — 1 р. 10 к.

#### Преобразовательная техника

165. Белов Г. А. Высокочастотные тиристорно-транзисторные преобразователи постоянного напряжения. — 45 к.

166. Розанов Ю. К. Полупроводниковые преобразователи со звеном повышенной частоты в автономных системах электроснабжения. — 65 к.

167. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник/Под ред. Г. С. Кучинского, В. В. Ермуратского. — 2 р. 10 к.

#### Электрические сети и системы

168. Арайс Р. Ж. АСУ треста электросетевого строительства. — 70 к.

45. Бушуев В. В. Динамические свойства электроэнергетических систем. — 40 к.

46. Гусейнов Ф. Г., Мамедяров О. С. Планирование эксперимента в задачах электроэнергетики. — 40 к.

169. Дьяков А. Ф. Системный подход к проблеме предотвращения и ликвидации гололедных аварий в электросистемах. — 65 к.

170. Марфин Н. И. Организация строительства электросетей сельскохозяйственного назначения. — (Промышленность — селу). — 55 к.

#### Электрические станции и подстанции

172. Бажанов С. А. Выбор аппаратуры для испытаний электрооборудования. — (Б-ка электромонтера). — 40 к.

172. Дорошев К. И. Эксплуатация комплектных распределительных устройств 6—220 кВ. — 80 к.

174. Рожкова Л. Д., Козулин В. С. Электрооборудование станций и подстанций: Учебник для техникумов. — 3-е изд., перераб. и доп. — 1 р. 60 к.

175. Иванов Н. А., Лернер Н. М., Рябцев Ю. И. Справочник по монтажу распределительных устройств выше 1 кВ на электростанциях и подстанциях/Под ред. Н. А. Иванова, Н. Г. Энтуса. — 3-е изд., перераб. и доп. — 1 р. 40 к.

176. Справочник по организации и механизации электромонтажных работ на электростанциях и подстанциях. — 3-е изд., перераб. и доп. — 1 р. 40 к.

173. Электрическая часть электростанций: Учебник для вузов/Под ред. С. Б. Усова. — 2-е изд., перераб. и доп. — 1 р. 60 к.

#### Режимы работы электроэнергетических систем

48. Димо Л. Модели REI и параметры режима. Объединенные энергосистемы: Пер. с рум. — 2 р.

177. Идельчик В. И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. — 1 р.

47. Применение вычислительных методов в энергетике/Под ред. В. А. Веникова, Ю. Ф. Архипцева. — 1 р. 80 к.

#### Автоматика, релейная защита и связь в энергосистемах

178. Агафонов С. С. Передача телесигналов в УКВ радиосетях. — (Б-ка электромонтера). — 25 к.

179. Айзенфельд А. И., Аронсон В. Н., Гловацкий В. Г. Фиксирующий индикатор сопротивления ФИС. — (Б-ка электромонтера). — 25 к.

180. Андриевский Е. Н. Диспетчерский пункт района распределительных сетей. — (Б-ка электромонтера). — 25 к.

181. Борисов В. А., Орехов Л. А. Продольные дифференциальные защиты ВЛ с проводными связями. — 60 к.

182. Гельфанд Я. С. Релейная защита распределительных сетей. — 2-е изд., перераб. и доп. — 1 р. 50 к.

183. Комаров Д. Т. Автоматизация электрических сетей 0,38—35 кВ в сельских районах. — (Б-ка электромонтера) (Промышленность — селу). — 30 к.

184. Любарский Ю. Я., Орнов В. Г. Диалоговые системы в диспетчерском управлении электрообъединениями. — 55 к.

191. Микуцкий Г. В., Скитальцев В. С. Высокочастотная связь по линиям электропередачи: Учебник для техникумов. — 3-е изд., перераб. и доп. — 1 р. 10 к.

185. Михайлов В. В. Магнитоэлектрики в устройствах автоматики и релейной защиты. — 35 к.

186. Молчанов В. В., Голанцов И. Б. Панели ПЗ-5/1 и ПЗ-5/2 дистанционных защит трансформаторов — (Б-ка электромонтера). — 25 к.

187. Оперативно-производственная информация в энергетике/В. В. Овчинников, В. Т. Орнов, Е. И. Петряев и др. — 55 к.

188. Удрис А. П. Релейная защита воздушных линий 110—220 кВ типа ЭПЗ — 1636. — (Б-ка электромонтера). — 35 к.

189. Шабал М. А. Защита и автоматика электрических сетей агропромышленных комплексов — (Б-ка электромонтера) (Промышленность — селу). — 35 к.

190. Штемпель Е. П. Полупроводниковый передатчик высокочастотной защиты АВЗК-80. — (Б-ка электромонтера). — 35 к.

#### Энергооборудование и электроснабжение промышленных предприятий

192. Бэнн Д. В., Фармер Е. Д. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки: Пер. с англ. — 1 р. 30 к.

193. Вишневецкий Л. М., Левин Л. Г. Я — электроналадчик. — (Б-ка электромонтера). — 45 к.

194. Кожемякин В. А. Монтаж силового электрооборудования промышленных предприятий. — 65 к.

49. Кулнич В. А. Индуктивно-емкостные управляемые трансформирующие устройства. — 65 к.

195. Никльсберг В. Д., Кожухаров В. Н. Монтаж освещения промышленных и жилых зданий. — 65 к.

196. Пирогов В. Е., Зевин М. Б. Монтаж электроустановок во взрывоопасных зонах. — 65 к.

197. Поляков А. М. Схемы электрооборудования грузоподъемных кранов общепромышленного назначения. — 55 к.

198. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности: Пер. с англ. — 65 к.

199. Трифонов А. Н., Черноусов А. И. Твой инструмент. — 3-е изд., перераб. и доп. — (Б-ка электромонтера). — 30 к.

201. Федоров А. А., Старкова Л. Е. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования по электроснабжению промпредприятий: Учеб. пособие для вузов. — 1 р.

200. Штейнбук Ю. П. Комплексная система управления качеством электромонтажных работ. — (Надежность и качество). — 55 к.

#### Электропривод

202. Арзипов А. А. Тепловые режимы низковольтных комплектных устройств. — 30 к.

Г 203. Лебедев А. М., Орлова Р. Т., Пальцев А. В. Следящие электроприводы станков с ЧПУ. — 65 к.

204. Перельмутер В. М., Сидоренко В. А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. — 1 р. 20 к.

50. Рассудов Л. Н., Мядзель В. Н. Электроприводы с распределенными параметрами механических элементов. — 55 к.

51. Рудаков В. В., Столяров И. М. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. — 65 к.

205. Терехов В. М. Элементы автоматизированного электропривода: Учеб. пособие для вузов. — 65 к.

206. Янковенко В. С., Арсеник С. С., Царик В. М. Расчет и конструирование элементов электропривода: Учеб. пособие для техникумов. — 75 к.

#### Электротермия

207. Альтгаузен А. П. Применение электронагрева и повышение его эффективности. — 45 к.

208. Квятковский С. Ф., Волкова Л. В., Герчук Ю. М. Бытовые электрические нагревательные приборы — 45 к.

209. Материалы для электротермических установок: Справочное пособие/Под ред. М. В. Гутмана. — 1 р. 10 к.

#### Электробезопасность

210. Вайнштейн Л. И. Памятка населению по электробезопасности. — 3-е изд., перераб. и доп. — 30 к.

212. Гаджиев Р. А., Долин П. А., Симочатов Н. П. Техника безопасности в электроэнергетических установках: Справочное пособие. — 2 р.

211. Гордон С. В. Монтаж заземляющих устройств. — (Б-ка электромонтера). — 30 к.

#### Светотехника

213. Розенталь Э. С. Электроустановочные устройства. — 1 р. 40 к.

#### РАДИОЭЛЕКТРОНИКА. АВТОМАТИКА И ТЕЛЕМЕХАНИКА

##### Электроника

270. Дмитренко Л. П. Тиристорные релейные и регулирующие устройства. — 40 к.

271. Ференци О. Электроника в нашем доме: Пер. с венг. — 90 к.

##### Автоматика и телемеханика

273. Азимов Р. К., Шипулин Г. Оптоэлектронные преобразователи больших перемещений на основе полых световодов. — (Б-ка по автоматике). — 25 к.

274. Гальперин М. В. Практическая схемотехника в промышленной автоматике. — 1 р. 30 к.

275. Жилин В. Г. Волоконно-оптические измерительные преобразователи скорости и давления. — 50 к.

276. Зотов М. Г. Аналитическое конструирование стационарных управляющих устройств. — (Б-ка по автоматике). — 35 к.

272. Комский Д. М., Игошев Б. М. Игротека автоматов. — (Научно-популярная б-ка школьника). — 30 к.

277. Кричевский Е. С., Волченко А. Г., Галушкин С. С. Контроль влажности твердых и сыпучих материалов. — 60 к.

278. Фандеев Е. И., Лушеев Г. А., Карчиков В. А. Специальные термометры с термопреобразователями сопротивления — (Б-ка по автоматике). — 35 к.

279. Чураков Е. П. Оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие для вузов. — 85 к.

##### Вычислительная техника

280. Автоматизация проектирования аналого-цифровых устройств/Э. И. Гитис, Б. Л. Собкин, С. А. Илюшин и др. — 1 р.

281. Горшков В. Н. Надежность оперативных запоминающих ЭВМ. — 65 к.

282. Григорьев В. Л. Программирование однокристалльных микропроцессоров. — 1 р. 10 к.

287. Домрачев В. Г., Матвеевский В. Р., Смирнов Ю. С. Схемотехника цифровых преобразователей перемещения: Справочное пособие. — 1 р. 70 к.

285. Корячко В. П., Курейчик В. М., Норенков И. П. Теоретические основы САПР: Учеб. пособие для вузов. — 1 р. 30 к.

286. Ларионов А. М., Майоров С. А., Новиков Г. И. Вычислительные системы, комплексы и сети: Учебник для вузов. — 1 р. 20 к.

288. Тетельбаум И. М., Шнейдер Ю. Р. Практика аналогового моделирования динамических систем: Справочное пособие. — 2-е изд., доп. — 1 р. 60 к.

## Третий международный симпозиум по теоретической электротехнике

(23—28 сентября 1985 г., Москва)

Симпозиум проходил в Московском энергетическом институте. В нем приняли участие представители социалистических стран: НРБ, ВНР, СРВ, Республики Куба, ПНР, СРР, СССР, ЧССР, СФРЮ. Общее количество участников симпозиума — 221 чел., в том числе 166 из СССР (представители 11 союзных республик и 46 городов страны) и 55 — из других социалистических стран.

В работе симпозиума участвовали заместитель министра высшего и среднего специального образования СССР И. М. Макаров и заместитель министра электротехнической промышленности Ю. А. Никитин.

Целью симпозиума явилось дальнейшее обсуждение содержания и перспектив развития дисциплины «Теоретическая электротехника» в вузах, ее роли в процессе формирования знаний инженеров электротехнических специальностей, вопросов повышения квалификации педагогических кадров, направлений научных исследований в области теоретической электротехники и в смежных электротехнических дисциплинах. В Москве была продолжена дискуссия по актуальным вопросам теоретической электротехники, начавшаяся на I и II Международных симпозиумах по теоретической электротехнике, проведенных в ЧССР в 1981 г. и в ГДР в 1983 г. Главным было обсуждение содержания дисциплины, проблем использования вычислительной техники в практике преподавания и в научных целях, вопросов создания искусственного интеллекта в области теоретической электротехники.

На первом пленарном заседании участников симпозиума приветствовали заместитель министра высшего и среднего специального образования И. М. Макаров и ректор МЭИ И. Н. Орлов. Председатель Международного организационного комитета академик К. С. Демирчян в своем докладе проанализировал предложения о создании единой программы дисциплины «Теоретическая электротехника» в странах социалистического содружества, о международных авторских коллективах по выпуску специализированных учебных пособий; изложил новые методические требования к курсу теоретической электротехники, определяемые все более широким внедрением вычислительной техники.

Заместитель министра электротехнической промышленности Ю. А. Никитин в своем выступлении высказал предложение о сотрудничестве Международного комитета по теоретической электротехнике с организацией СЭВ «Интерэлектро».

Дальнейшая деятельность симпозиума проходила по трем секциям, на обсуждение которых были представлены 106 основных и 79 стендовых докладов.

В *первой секции* обсуждались методологические вопросы содержания, путей развития и программы курса «Теоретическая электротехника», проблемы отражения материалистического мировоззрения и развития общего теоретического мышления в курсе, перспективы развития ряда разделов дисциплины «Теоретическая электротехника».

Одним из важнейших направлений дальнейшего развития обсуждаемой дисциплины является усиление связи содержания дисциплины со специальностями и специализациями студентов. Этот актуальный вопрос был рассмотрен, в частности, в докладах В. Г. Герасимова (СССР) «Профилизация электротехнических дисциплин для различных инженерных специальностей», К. Гола (ГДР) «К вопросу о рациональном выборе узловых пунктов содержания курса «Теоретическая электротехника» при ограниченном бюджете времени».

Большое количество докладов и стендовых сообщений посвящено новым разделам, которые целесообразно включить в курс для ряда специальностей. Здесь нужно отметить доклады И. М. Чиженко и А. И. Чиженко (СССР) «Цепи с вентильными элементами в курсе ТОЭ», С. Фархи (НРБ) «О необ-

ходимости включения в курс ТОЭ нового раздела «Цепи с переключаемыми конденсаторами», Р. Сикоры и Я. Радецкого (ПНР) «Цифровые фильтры в курсе ТОЭ».

Эти и другие доклады, а также оживленная дискуссия по новым вопросам показывают, что дисциплина «Теоретическая электротехника» в настоящее время быстро развивается, и вопросы построения курса, введения в его состав новых разделов требуют пристального внимания Международного комитета по теоретической электротехнике и Научно-методического совета по ТОЭ и ИЭФ Минвуза СССР.

Очень важный вопрос — о подготовке специалистов по теоретической электротехнике — рассмотрен в докладе К. С. Демирчяна, В. Г. Миронова, В. М. Юринова (СССР) «Принципы подготовки молодых специалистов по теоретической электротехнике в рамках специальности «Инженерная электрофизика». Высказанные здесь предложения получили полное одобрение участников симпозиума.

Значительная часть докладов была посвящена мировоззренческим вопросам преподавания курса теоретической электротехники. Здесь нужно отметить доклады К. Чаповой и И. Чапа (ЧССР) «Связь основного курса физики и теоретической электротехники», В. Н. Журавлева, Т. Е. Зимы, А. М. Брянцева, В. И. Денисенко (СССР) «Мировоззренческий аспект преподавания курса ТОЭ для электротехнических специальностей», Б. И. Яхинсона (СССР) «Законы материалистической диалектики и их отражение в лекциях курса «Теоретическая электротехника». Эти доклады показали, что на кафедрах активизируется работа, цель которой — подчеркнуть место теоретической электротехники в ряду фундаментальных дисциплин, отметить ее ведущую роль в формировании материалистического мировоззрения инженера.

Много выступлений было посвящено методическим темам, среди которых можно отметить доклад Л. Генова (НРБ) «О магнитном поле токов смещения при изложении курса ТОЭ» и доклад Е. С. Кухаркина (СССР) «Метод импедансного аналога электромагнитного поля и опыт его применения в учебной работе».

На заседаниях *второй секции* рассматривались проблемы и опыт работы по применению ЭВМ в курсе теоретической электротехники: использование методов вычислительного эксперимента и создание специального «банка знаний» в процессе преподавания курса «Теоретическая электротехника»; применение вычислительной техники в лекционном курсе; в практических занятиях, в лабораторном практикуме; возможности вычислительной техники и аспекты создания автоматизированных обучающих систем (АОС) для самостоятельного изучения курса «Теоретическая электротехника».

Доклады В. Георгиева (НРБ), Нгуен Тхе Тханга и Нгуен Минь Дыка (СРВ), И. Альварес Бельо (Куба) ознакомили собравшихся с применением вычислительной техники в учебном процессе этих стран.

По вопросу применения вычислительной техники на практических занятиях наибольший интерес вызвали доклады К. С. Демирчяна и др. (СССР) «Методические основы применения и технические средства ЭВМ на практических занятиях по курсу ТОЭ», В. Г. Миронова и И. М. Пунькова (СССР) «Методологические проблемы применения ЭВМ при изучении базовых электротехнических дисциплин». Авторы показали, что применение вычислительной техники позволяет значительно расширить и углубить материал, изучаемый в курсе ТОЭ, в частности, на практических занятиях и при выполнении расчетных заданий.

Существенное развитие получила за последние годы методика применения вычислительной техники в лабораторном практикуме. Здесь следует отметить доклады О. Бенды, И. Бой-

ны и С. Геди (ЧССР) «Использование микро-ЭВМ в лабораторных занятиях по теории цепей», С. Больновского и С. Кжеминьского (ПНР) «Экспериментально-вычислительная лаборатория по электромагнитному полю», О. А. Кукайниса, К. К. Табакса, Ю. А. Чостсона и В. Н. Чувичина (СССР) «Применение микро-ЭВМ при проведении практических занятий и лабораторного практикума по курсу ТОЭ», в которых подчеркивалось, что наиболее перспективно такое применение вычислительной техники, когда она используется не только для обработки результатов измерений, но и для автоматизации эксперимента.

Важные работы проведены в области обучающих программ, этому были посвящены, в частности, доклады Г. М. Торбенкова, Н. И. Беглепова, М. И. Грамма и Е. И. Калугина (СССР) «Опыт использования контролирующих и диалоговых систем в преподавании курса ТОЭ», Л. С. Архангельской и В. П. Булекова (СССР) «Оптимизация характеристик автоматизированных обучающих систем на базе мини- и микро-ЭВМ». В докладах показана возможность анализа ошибок, выделения основных стандартных обучающих логических операций и их алгоритмизации с помощью ЭВМ.

Обеспечение расчетных заданий и, в частности, построение индивидуализированных заданий отражено в докладах Г. Тима и Г. Хельма (ГДР), В. М. Казанского и др. (СССР) «Применение вычислительной техники для генерации индивидуальных домашних заданий по курсу ТОЭ и активной проверки их выполнения».

Ряд докладов был посвящен методической и программной разработке на основе новых методов анализа и расчета цепей и полей, вводимых в курс теоретической электротехники. Следует отметить доклады Р. Сикоры (ПНР) «Автоматизация расчетов гибридного метода конечных элементов и контурных элементов», И. А. Федоровой, А. П. Кузнецова и Л. Ю. Шилина (СССР) «Развитие на основе применения ЭВМ методов исследования дискретных электрических цепей систем управления», Т. А. Глазенко и А. Н. Балясниковой (СССР) «Расчет вентиляльных электрических цепей с дискретно-изменяющимися параметрами с использованием вычислительной техники», В. И. Пищикова (СССР) «Анализ переходных процессов в линейной цепи на основе жордановой формы матрицы параметров с применением ЭВМ», Л. Зомбори и Д. Весели (ВНР) «Методы теории поля в моделировании полупроводниковых структур». Содержание этих докладов связано и с новыми вопросами, обсуждавшимися в первой секции, и свидетельствует о непрерывном развитии дисциплины «Теоретическая электротехника».

Участники симпозиума ознакомились с работой вычислительной учебной лаборатории кафедры ТОЭ МЭИ и учебно-исследовательской САПР электрических цепей кафедры электрофизики МЭИ.

При обсуждении докладов отмечено существенное развитие работ по применению вычислительной техники в учебном процессе за два года, прошедших после предыдущего симпозиума. В то же время были указаны и недостатки: многие работы ведутся разобщенно, на разных методических принципах, на различных технических и программных средствах. В связи с этим было решено созвать совещание представителей кафедр для выработки согласованных требований к методике, техническому и программному обеспечению, которые будут применяться при использовании ЭВМ в курсе ТОЭ.

Доклады третьей секции были посвящены новым научным и методическим результатам теории электромагнитного поля и теории электрических цепей, полученным на кафедрах теоретической электротехники. Было представлено 38 основных и 47 стендовых докладов. В третьей секции обсуждались также новые логико-математические и другие подходы к анализу и синтезу линейных и нелинейных цепей.

Представленные доклады показали высокий уровень научных исследований, проводимых на кафедрах теоретической электротехники стран социалистического содружества. Достигнуты значительные успехи в построении общей теории электрических цепей. Об этом свидетельствуют доклады С. В. Страхова (СССР) «Анализ методов оптимизации режимов работы электрических цепей», М. И. Шакирова (СССР) «Введение в общую теорию преобразований электрических цепей», Х. Росмана, Г. Савина и Л. Гораша (СРР) «Некоторые вопросы теории линейных цепей с реактивными элементами», В. И. Пищикова и А. А. Блитштейна (СССР) «Прямой метод определения входных матриц цепочечных схем», П. П. Матханова (СССР) «О синтезе одного класса пассивных нелинейных цепей», Нгуен Бинь Тханя (СРВ) «Математическое описание и анализ скачков

переменных состояния в сингулярных задачах динамической системы».

Нужно отметить актуальность работ, посвященных исследованию цепей с дискретно-изменяющимися параметрами и структурой. Этой теме были посвящены доклады В. Г. Миронова (СССР) «Методы анализа и синтеза дискретно-аналоговых цепей» и Г. Ненова (НРБ) «Итоги научно-исследовательских работ в области цепей с переключаемыми конденсаторами».

Практическую направленность имели доклады, излагающие теорию цепей, предназначенных для преобразования энергии: И. М. Чиженко (СССР) «Компенсационные преобразователи электрического тока», Г. Гонды и А. Бокора (ВНР) «Исследование динамической характеристики электрического преобразователя мощности на ЭВМ».

На симпозиуме нашла отражение большая работа по исследованию особенностей электрических процессов в нелинейных электрических и электронных цепях. Следует отметить доклады А. В. Бондаренко (СССР) «Развитие методов синтеза линейных цепей на некоторый класс нелинейных схем», Е. Филиппова, До Трунг Та, В. Бюнтига (ГДР, СРВ) «Синтез генератора случайных колебаний и «Синтез удвоителя частоты для цифровых импульсных устройств», Ф. П. Жаркова (СССР) «Обменная мощность в несинусоидальных режимах и нелинейных цепях» и др.

Большой цикл докладов был посвящен результатам исследования электромагнитных полей и применяемым здесь новым методам. Большой интерес участников вызвали доклады В. Савова, Ж. Георгиева и Е. Богданова (НРБ) «Об анализе электромагнитных полей в промышленных устройствах», В. А. Чежурина, К. С. Демирчяна, В. Н. Боронина (СССР) «Метод магнитных зарядов в теоретической электротехнике», В. Г. Герасимова (СССР) «Расчет электромагнитного поля катушки произвольной формы, расположенной вблизи проводящего тела», С. Кжеминьского (ПНР) «Синтез и идентификация электромагнитных полей», А. Б. Новгородцева и В. М. Юринова (СССР) «Постановка и методы решения задач синтеза электрических и магнитных полей».

Результаты работы секции позволили определить основные направления актуальных научных исследований на кафедрах теоретической электротехники социалистических стран и внести предложения об организации постоянного международного сотрудничества и координации фундаментальных исследовательских работ.

Участники симпозиума на заключительном пленарном заседании единодушно одобрили заключительный протокол, который был предварительно обсужден на заседании «За круглым столом» представителями всех делегаций, участвовавших в работе симпозиума.

В нем, в частности, подчеркивается:

важность создания для всех стран-участниц части программы дисциплины «Теоретическая электротехника», которая призвана, с одной стороны, обеспечить необходимый для всех стран СЭВ уровень подготовки будущих специалистов энергетического и электротехнического профиля и специалистов по электронной технике, а с другой, — обменяться имеющимся опытом преподавания дисциплины для его дальнейшего совершенствования;

особая роль методического обеспечения, методических разработок по созданию и применению проблемно-ориентированных языков и фонда программ, автоматизированных обучающих систем, специального «банка знаний» по всем вопросам, связанным с изучением и преподаванием дисциплины «Теоретическая электротехника» на основе использования вычислительной техники, что, во-первых, качественно изменит процесс обучения, а во-вторых, будет способствовать быстрому освоению приобретаемых вычислительных средств;

необходимость учета при подготовке инженеров и в научной деятельности кафедр ТЭ проблем современного развития и потребностей энергетики, электротехники и электроники;

исключительная важность широкого и быстрого внедрения средств вычислительной техники во все виды инженерной деятельности, что ставит перед преподавателями и учебным персоналом высших учебных заведений задачу повышения квалификации на основе существующих центров использования вычислительной техники в учебном процессе.

Для усиления фундаментальных исследований и эффективного использования новых вычислительных средств в промышленности и в подготовке электротехнических кадров рекомендовано многостороннее сотрудничество высших учебных заведений в рамках СЭВ с составлением плана координации основных научно-исследовательских и учебно-методических работ в области теоретической электротехники.

Симпозиум постановил превратить Международный комитет по теоретической электротехнике в постоянно действующий орган СЭВ, периодические созывы которого должны происходить в интервалах между очередными сессиями международных симпозиумов. В связи с этим принято предложение Минэлектротехпрома СССР об организации рабочей группы по теоретической электротехнике в рамках «Интерэлектро» СЭВ.

Учитывая растущую роль фундаментализации высшего специального образования и необходимость специалистов широкого профиля в области электромагнитных явлений, принято считать целесообразным выпуск инженеров по специальности «Теоретическая электротехника» для промышленности и научно-исследовательских институтов на основе опыта ГДР и других социалистических стран, считать необходимым организовать периодическое издание — международный журнал по проблемам теоретической электротехники. Поручено комитету по подготовке следующего Международного симпозиума рассмотреть возможности каждой страны-участницы в создании такого журнала, а также в издании тематических сборников по теоретической электротехнике в рамках существующих журналов. Рекомендовано ввести в советских журналах «Известия

АН СССР. Энергетика и транспорт», «Электричество», «Вестник высшей школы», «Электротехника», «Электронное моделирование» (СССР), электротехнических журналах других стран рубрики по теоретической электротехнике для публикаций результатов научно-исследовательских и методических работ специалистов из стран СЭВ.

В заключительном протоколе также отмечено, что участники высоко оценили значение проведенного симпозиума и выразили мнение, что он стал источником многих ценных инициатив, особенно по совершенствованию содержания курса теоретической электротехники и в области внедрения вычислительной техники в учебный процесс. Симпозиум способствовал улучшению научных связей между кафедрами теоретической электротехники социалистических стран.

Участники симпозиума предложили провести IV Международный симпозиум по теоретической электротехнике в 1987 г. в Венгерской Народной Республике и избрали профессора Ф. Фодора председателем Международного комитета на следующий период.

МИРОНОВ В. Г., НЕМОВ Ю. Н.



УДК 621.313.322-81(083.75)

## Новый стандарт на турбогенераторы

С января 1986 г. введен в действие новый стандарт на турбогенераторы [1], которые заменят действовавший с 1976 г. ГОСТ 533—76.

Новый стандарт отражает изменения в турбогенераторостроении, происшедшие за последние годы, соответствует стандарту СЭВ 3147—81, в нем учтены рекомендации МЭК, имеющиеся в публикациях 34-1 и 34-3. В ГОСТ 533—85 в соответствии с требованиями СТ СЭВ 3147—81 изменены номинальные мощности ряда турбогенераторов. Так, вместо турбогенераторов мощностью 100, 200 и 300 МВт введены соответственно генераторы 110, 220 и 320 МВт. Эти изменения связаны с созданием и внедрением новой единой унифицированной серии турбогенераторов мощностью  $63 \div 800$  МВт [2].

В настоящее время электротехнической промышленностью освоены турбогенераторы мощностью 1000 МВт как в двух-, так и в четырехполюсном исполнении для АЭС [3], поэтому генераторы этого класса также включены в ГОСТ 533—85.

С учетом выполненных исследований при создании единой унифицированной серии в турбогенераторе мощностью 800 МВт предусмотрен несколько более высокий к. п. д.

Характерной особенностью современного турбогенераторостроения является необходимость частых пусков и остановов блоков средней мощности [4]. Учитывая эти потребности эксплуатации, в ГОСТ 533—85 впервые включено требование об обеспечении не менее 10 000 включений за срок службы генераторов.

В новой редакции стандарта впервые установлено верхнее значение температуры окружающего воздуха ( $40^\circ\text{C}$ ), при котором возможна работа турбогенератора.

Чистота водорода имеет важное значение для обеспечения эффективности работы турбогенератора. Так, при чистоте водорода 97 % потери в турбогенераторе с давлением водорода 0,4 МПа увеличиваются на 100 кВ по сравнению с таковыми при чистоте водорода 98 %. Поэтому в ГОСТ 533—85 указано предельное значение чистоты водорода (98 %) для турбогенераторов с непосредственным охлаждением.

Для облегчения эксплуатации турбогенераторов в стандарте впервые приведены дифференцированные в зависимости от мощности (объема водорода в корпусе) нормы утечки водорода из корпуса при номинальном давлении.

В ГОСТ 533—85 впервые введены требования к турбогенераторам при их работе с отклонениями напряжения на выводах  $i$  частоты. Принято, что турбогенераторы должны сохранять номинальную и максимальную длительную мощность, если сумма абсолютных значений отклонений напряжения и частоты не превышает 6 %. При работе с отклонениями по частоте и напряжению следует иметь в виду, что продолжительная работа с номинальной мощностью при повышенном напряжении и пониженной частоте может привести к росту превышений температур приблизительно на 10 К.

В последние годы накоплен большой опыт по работе турбогенераторов в несимметричных режимах [5], что позволило уточнить требования к генераторам в этих режимах. В новом стандарте предусмотрена длительная работа при несимметричной нагрузке, если токи обратной последовательности не превышают 8 % номинального тока статора, при этом допускается повышение температуры активных частей машин на 5 К. Установлено также допустимое значение произведения квадрата тока обратной последовательности на допускаемое время работы в секундах  $I_2^2 t$  для турбогенераторов мощностью 800 МВт и выше, равное 6 с.

Для современного этапа развития турбогенераторостроения характерно выполнение большого объема исследований и опытных работ по обеспечению работы генераторов в режиме потребления реактивной мощности [5]. По результатам этих исследований, воплощенных в более совершенные конструкции торцевой зоны сердечника статора турбогенераторов, была установлена возможность работы при номинальной активной мощности и коэффициенте мощности, равном 0,95, что и зафиксировано в ГОСТ 533—85. Новые конструкции внедрены в генераторах единой унифицированной серии. Они предусматривают применение магнитного шунта над нажимной плитой, установку медного экрана между нажимной плитой и сердечником статора. В зубцах крайних пакетов выполняются прорези, сами крайние пакеты имеют меньшую толщину.

За последнее десятилетие были подробно исследованы акустические характеристики турбогенераторов. Были изучены источники повышенного шума, возможные мероприятия по его ограничению [6]. По результатам исследований был существенно снижен уровень вибраций сердечника и корпуса статора (например, в турбогенераторе мощностью 800 МВт типа ТВВ-800-2 двойная амплитуда вибрации сердечника статора 30 мкм, корпуса 6 мкм). Для снижения шума узла щеточного аппарата предложено применение шумозащитного кожуха, включающего элементы звукоизоляции, звукопоглощения и демпфирования. Все это позволило принять в качестве гарантированного уровень звука, измеренный на расстоянии 1 м от наружного контура турбогенератора, не выше 90 дБА.

Важным мероприятием для обеспечения надежности работы генератора является кратковременное резервирование подачи масла (или другой смазочной жидкости) при перерывах или прекращении поступления масла от источников маслоснабжения. Такое требование включено в новую редакцию ГОСТ 533—85.

В турбогенераторах с водородным охлаждением всегда уделялось повышенное внимание проблемам пожарной и взрывобезопасности. В ГОСТе предписывается необходимость обеспечения возможности установки газоанализаторов для контроля за утечкой водорода в картеры подшипников и специальных патрубков подачи инверторного газа для продувки картеров.

## Юрий Анатольевич Борцов

(К 60-летию со дня рождения)

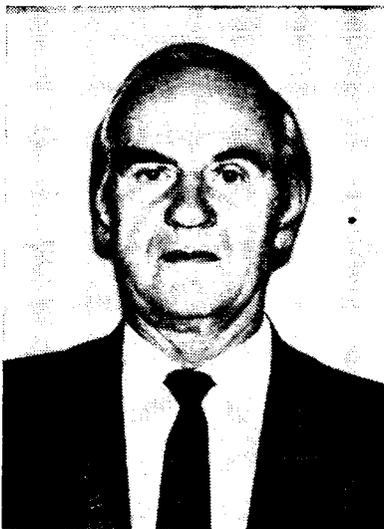
В апреле 1986 г. исполняется 60 лет со дня рождения видного специалиста в области электропривода и систем автоматического управления, доктора технических наук, профессора Юрия Анатольевича Борцова.

Трудовую деятельность Ю. А. Борцов начал в 1942 г. дежурным электриком сталепроволочного цеха на Белорецком металлургическом комбинате. В мае 1943 г. он добровольно ушел в армию и был зачислен курсантом артиллерийского училища, которое и закончил в 1944 г. Участвовал в боях, командуя взводом разведки. В 1946 г. был принят в члены КПСС.

Демобилизовавшись, Ю. А. Борцов поступил в Московский энергетический институт, с отличием закончил его в 1953 г. После непродолжительной работы во ВНИИметмаше учился в аспирантуре МЭИ. В 1957—1965 гг. работал в Челябинском политехническом институте доцентом кафедры автоматизированного электропривода, деканом энергетического факультета, избирался членом парткома института, Центрального райкома КПСС Челябинска.

Последние двадцать лет Ю. А. Борцов работает в Ленинградском электротехническом институте им. В. И. Ульянова (Ленина), вначале доцентом и профессором кафедры электрификации и автоматизации промышленности, а с 1977 г. — заведующим кафедрой систем автоматического управления. В 1974 г. защитил докторскую диссертацию, в 1976 г. утвержден в ученое звание профессора. В 1975—1980 гг. работал деканом факультета электротехники и автоматизации ЛЭТИ.

Б. А. Борцов является автором 150 научных работ — монографий, учебных пособий, статей и авторских



свидетельств. Более 10 статей опубликовано им в журнале «Электричество». Он разработал структурно-топологические методы исследования динамики промышленных систем электропривода, включая методику и технические средства экспериментального определения параметров и частотных характеристик систем электропривода и автоматики, впервые предложил аналитические оценки влияния и способы настройки регуляторов автоматических систем с упругими связями. В последнее десятилетие под руководством профессора Ю. А. Борцова и при его непосредственном участии создана прикладная теория автоматических систем с адаптивным, модальным и разрывным управлением, выполнены большие работы по оптимизации динамики электроприводов не-

прерывных линий высокопроизводительных прокатных станков, бумагоделательных машин, испытательных комплексов механических трансмиссий вертолетов, организовано серийное производство тиристорных электроприводов с адаптивными регуляторами.

Написанные лично Ю. А. Борцовым и в соавторстве с учениками монографии и учебные пособия получили широкую известность среди специалистов нашей страны и стран СЭВ. В этом году выходит его монография (в соавторстве с И. Б. Юнгером) «Автоматические системы с разрывным управлением».

Профессор Ю. А. Борцов проводит большую учебную, методическую и научно-организационную работу, являясь членом президиума Координационного совета по системам автоматического управления Минвуза СССР, членом президиума Редакционно-издательского совета Минвуза РСФСР, членом Научно-методического совета «Робототехнические системы» Минвуза СССР, ведет работу в НТОЭ и ЭП. С 1975 г. он возглавляет советы по защите докторских и кандидатских диссертаций в области электрооборудования и систем управления.

За тридцать лет научно-преподавательской деятельности Ю. А. Борцов подготовил и воспитал большой отряд инженеров и научных работников, преподавателей вузов, организаторов производства.

За боевые и трудовые заслуги Ю. А. Борцов награжден орденом Красной Звезды, орденом Отечественной войны 2-й степени, многими медалями и почетными знаками.

Группа товарищей

Исследования последних лет [5] показали повышенную опасность для валопровода турбоагрегата способа включения его в сеть методом самосинхронизации, поэтому в ГОСТ 533—85 специально указывается на необходимость использования в нормальных условиях метода точной автоматической синхронизации.

В связи с использованием в практике эксплуатации маневренных режимов работы в новой редакции стандарта на турбогенераторы определена скорость набора и изменения активной и реактивной мощности (не менее 6 % номинальной в минуту).

В настоящее время все мощные турбогенераторы выполняются с водяным охлаждением обмотки статора. Как показал опыт эксплуатации генераторов с таким охлаждением обмотки, надежность машины (при прочих равных условиях) обеспечивается, если дистиллят для охлаждения обмотки имеет удельное электрическое сопротивление на уровне 2000 Ом·м, что и нашло отражение в ГОСТ 533—85.

В новом стандарте впервые в мировой практике турбогенераторостроения введены гарантированные показатели надежности, которым должны соответствовать турбогенераторы высшей категории качества. Введение таких показателей стало возможным в результате большого объема исследований, позволивших обеспечить низкие и стабильные уровни нагревов и вибраций, улучшить конструкцию и технологию изготовления и генераторов в целом [2].

В новой редакции стандарта уточнены также программы и условия проведения приемочных, приемо-сдаточных, периодических и типовых испытаний турбогенераторов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 533—85. Машины электрические вращающиеся Турбогенераторы. Общие технические условия. М.: Изд. стан дартов, 1985.
2. Единая унифицированная серия турбогенераторов/И. А. Глебов, Я. Б. Данилевич, Л. В. Курилович, Г. М. Хуторецкий — Электричество, 1981, № 11.
3. Четырехполюсный турбогенератор мощностью 1000 МВт для АЭС/Л. В. Курилович, А. М. Трофимов, И. Ф. Филиппов, Г. М. Хуторецкий — Электротехника, 1982, № 9.
4. Глебов И. А., Мамиконянц Л. Г. Электрические машины. Международная конфигурация по большому электрическим системам (СИГРЭ—78). — М.: Энергоиздат, 1981.
5. Учет аномальных режимов при конструировании л эксплуатации мощных турбогенераторов/И. А. Глебов, Я. Б. Данилевич, Л. Г. Мамиконянц, Г. М. Хуторецкий — Электричество, 1983, № 11.
6. К вопросу об уровнях шума мощных турбогенераторов/Г. М. Хуторецкий, Е. М. Курневич, Р. К. Шабаев, И. Г. Битюгова — Электротехника, 1982, № 12.

Данилевич Я. Б., докт. техн. наук

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

Негневский М. В., Файбисович В. А. Оперативный контроль состояния распределительной сети 6—20 кВ по признакам аварийного режима	1	Попов В. А. Схемы замещения передачи в режиме «два провода — земля»	52
Денисенко Г. И., Васко П. Ф., Брыль А. А., Пекур П. П. Режимы работы ветроэлектрических установок с генераторами постоянного тока	7	Козлов М. И., Гершенкрой В. Л., Гордиенко Н. И., Гошуренко В. И. Трехфазные трансформаторы с пространственным сердечником и разнесенными обмотками	54
Груздев И. А., Торопцев Е. Л., Устинов С. М. Определение настроек АРВ для совокупности режимов энергосистемы	11	Павлов В. А., Пичугин Ю. П., Романенко И. Н. Восстановление электрической прочности грозоразрядных промежутков с подвижными электродами после прохождения больших импульсных токов	56
Литкенс И. В., Филинская Н. Г. Выбор настроек АРВ в многомашинной энергосистеме	15	Гефле О. С. Применение тепловизионного метода для диагностики состояния изоляции высоковольтных конструкций	58
Мани Э. Г., Тиунчик В. М. Кольцевые электромеханические инерционные аккумуляторы	19	Клепиков В. Б. О «фрикционных» автоколебаниях в электроприводах	59
Новожилов О. П. Нелинейные реактивные элементы с использованием конденсатора и управляемого ключа	25	Широков Н. Г., Кутузов С. И. Метод определения э. д. с. индуктивных сопротивлений синхронных генераторов малой мощности на частотах высших гармоник	62
Муравлев О. П. Разработка теории и практических методов управления качеством электрических машин	29	Голицын В. П., Горелов В. П., Минакова Н. Н., Сквирская И. И., Ушаков В. Я. Низковольтные характеристики материала на основе каучука с углеродным наполнителем для объемных резисторов	64
Варлей В. В. Уравнения движения электродвигателей с деформируемым ротором	32	Межеричкий А. В., Кандыба П. Е. Локальные потери энергии в пьезокерамическом резонаторе при электрическом возбуждении	66
Лопухина Е. М., Семенчуков Г. А., Чуев С. Г. Универсальная математическая модель асинхронного двигателя с экранированными полюсами	39		
Цветков В. А. О силах магнитного тяжения низкой пространственной кратности в многополюсных электрических машинах	43		
Баранов П. Р., Гринберг В. С. Выбор схемы включения двухобмоточного электромагнита	47		
<b>СООБЩЕНИЯ</b>		<b>БИБЛИОГРАФИЯ</b>	
Гуревич Ю. Е., Либова Л. Е., Тимофеев В. А. Учет нагрузки при оптимизации распределения реактивных мощностей	50	<b>ХРОНИКА</b>	75



## CONTENTS

		REPORTS	
Negnevitski M. V., Faibisovitch V. A. — Operative Monitoring of the State of 6—20 kV Distribution Networks Employing Fault Condition Data	1	Gurevitch U. E., Libova L. E., Timofeyev V. A. — Accounting for the Load in Optimization of Reactive Power Flow	50
Denisenko G. I., Vasko P. F., Bril A. A., Pekur P. P. — Operating Conditions of Wind-Driven Electric Plants Employing DC Generators	7	Popov V. A. — Equivalent Circuits for «Two-Conductor Ground Return» Operation of Transmission Lines	52
Gruzdiev I. A., Toroptsev E. L., Ustinov S. M. — Finding Automatic Field Control Settings for a Multitude of Power System Operating Conditions	11	Kozlov M. I., Gershenkroy V. L., Gordienko N. I., Goshurenko V. I. — Three-Phase Transformers With a Spatial Core and Spread Windings	54
Litkens I. V., Filinskaya N. G. — Selection of Automatic Field Control Settings in a Multi-Generator Power System	15	Pavlov V. A., Pichugin U. P., Romanenko I. N. — Electrical Withstand Strength Recovery of Movable-Electrode Surge Gaps After Passing Large Current Surges	56
Mann E. G., Tiunchik V. M. — Electromechanical Ring-Type Inertial Energy-Storage Devices	19	Gefle O. S. — Application of the Infra-Red Image Method for Diagnosis of the State of HV Element Insulation	58
Novozhilov O. P. — Non-Linear Lossless Elements Employing a Capacitor and Controlled Switch	25	Kleplkov V. B. — On «Frictional» Self-Excited Oscillations in Electric Drives	59
Muravlev O. P. — Development of the Theory and Practise of Quality Management for Electrical Machines	29	Shirokov N. G., Kutuzov S. I. — A Method for Finding the EMF and Reactances of Small Synchronous Generators at Upper Harmonic Frequencies	62
Varley V. V. — The Performance Equations for Electric Motors Having a Deformable Rotor	32	Golitsin V. P., Gorelov V. P., Minakova N. N., Skvirskaya I. I., Ushakov V. J. — Low-Voltage Characteristics of a Material Based on Carbon-Filled Rubber Employed in Bulk Resistors	64
Lopukhina E. M., Semenchukov G. A., Chuyev S. G. — A Universal Mathematical Model for a Shielded-Pole Induction Motor	39	Mezheritski A. V., Kandiba P. E. — Local Energy Losses in an Electrically Excited Ceramic Piezoelectric Resonator	66
Tsvetkov V. A. — On Low-Space-Order Magnetic Forces in Multi-Pole Electric Machines	43		
Baranov P. R., Greenberg V. S. — Selection of the Connection Circuit for a Two-Coil Electromagnet	47		
		<b>BIBLIOGRAPHY</b>	71
		<b>CHRONICLE</b>	75



# Рефераты публикуемых статей

- УДК 621.315.1:621.317.333.4  
Оперативный контроль состояния распределительной сети 6—20 кВ по признакам аварийного режима. Негневский М. В., Файбисович В. А. — «Электричество», 1986, № 4  
Рассмотрены вопросы оперативного контроля состояния секционирующих аппаратов распределительных сетей 6—20 кВ сельскохозяйственного назначения. Разработаны алгоритмы анализа состояния сети по косвенным признакам аварийного режима с использованием микроЭВМ. Для повышения достоверности оперативного контроля состояния сети предложены дискретная и дискретно-аналоговая системы диагностики отказов коммутационных аппаратов. Для исследования эффективности оперативного контроля разработана методика, использующая основные положения теории информации и теории вероятностей. Приведены результаты расчетов. Библ. 8.
- УДК 621.311.24:621.313.12.024.001.24  
Режимы работы ветроэлектрических установок с генераторами постоянного тока. Денисенко Г. И., Васько П. Ф., Брыль А. А., Пекур П. П. — «Электричество», 1986, № 4  
Изложены методика и результаты расчета параметров установившихся режимов работы ветроэлектрической установки с генератором постоянного тока мощностью 20 кВт в функции независимо изменяющихся величин скорости ветра и подключаемой мощности потребителей. Рассмотрена схема возбуждения ветроэлектрической установки в составе ветроэлектростанции и возможность параллельной работы установок в различных ветровых потоках. Библ. 8.
- УДК 621.311.016.351.001.24  
Определение настроек АРВ для совокупности режимов энергосистемы Груздев И. А., Горопцев Е. Л., Устинов С. М. — «Электричество», 1986, № 4  
Изложена методика численного поиска настроек АРВ — СД по условию эффективного демпфирования маловозмущенных переходных процессов. Разработанная методика использована для решения задачи эффективного управления качеством переходных процессов при единой настройке регуляторов возбуждения генераторов для совокупности режимов сложной энергосистемы. Библ. 4.
- УДК 621.311.016.351.001.24  
Выбор настроек АРВ в регулируемой многомашинной энергосистеме Литкенс И. В., Филинская Н. Г. — «Электричество», 1986, № 4  
Разработана методика расчета областей оптимальных настроек АРВ в многомашинной энергосистеме, обеспечивающих наибольший уровень демпфирования системных электромагнитных колебаний в заданном диапазоне нормальных и послеаварийных режимов. Библ. 6.
- УДК 537.224.001.3:620.93  
Кольцевые электрохимические инерционные аккумуляторы. Манн Э. Г., Тиунчик В. М. — «Электричество», 1986, № 4  
Рассмотрен кольцевой электрохимический инерционный аккумулятор (ЭМИА) при совмещении маховика с обратной электрической машиной на магнитных подшипниках. Представлены некоторые общие соображения по компоновке ЭМИА и намечены пути создания и проектирования кольцевых ЭМИА. Библ. 13.
- УДК 621.313:658.562  
Разработка теории точности и практических методов управления качеством электрических машин. Муравлев О. П. — «Электричество», 1986, № 4  
Разработана теория точности электрических машин, позволяющая решить широкий круг задач, связанных с проектированием, изготовлением и эксплуатацией. Точность является основным количественным параметром при разработке системы управления качеством изделия. Библ. 11.
- УДК 621.314:621.313.17.001.24  
Уравнения движения электродвигателей с деформируемым ротором. Варлей В. В. — «Электричество», 1986, № 4  
Рассматриваемые электродвигатели представляют сочетание параметрической синхронной электрической машины соответствующего типа и волнового редуктора с относительно большим коэффициентом передачи. Уравнения электрического равновесия приведены в осях  $d, q$ , перемещающихся синхронно с осями деформации гибкого ротора ВД. В качестве математической модели механического движения принимается уравнение деформации тонкостенного кольца, подверженного воздействию механических и электромагнитных сил, определяемых типом электродвигателя.
- Уравнения деформации, представленные в неподвижных осях  $x, y$ , и уравнения электрического равновесия в синхронно вращающихся осях  $d, q$  позволяют провести аналитические исследования рассматриваемых электродвигателей в рамках допущений, общепринятых в теории электрохимического преобразования энергии. Библ. 6.
- УДК 621.318.37.001.24  
К выбору схемы включения двухобмоточного электромагнита. Баранов П. Р., Гринберг В. С. — «Электричество», 1986, № 4  
Приведен сравнительный анализ в общем виде смешанной схемы включения секционированного двухобмоточного электромагнита и известной схем с последовательным и параллельным включением обмоток при отсутствии и при наличии вентилей. Показано, что при рациональном использовании известных схем они предпочтительнее смешанной. Приведено сравнение теоретических и экспериментальных данных. Библ. 15.
- УДК 621.311.153.016.25.001.24  
Учет нагрузки при оптимизации распределения реактивных мощностей. Гуревич Ю. Е., Либова Л. Е., Тимофеев В. А. — «Электричество», 1986, № 4  
Предложено при оптимизации распределения реактивных мощностей в многоуровневых схемах представлять реактивную мощность в каждом узле примыкания схем более низкого уровня в виде функции всех напряжений в узлах примыкания и использовать эту функцию при описании соответствующего узла нагрузки в схеме более высокого уровня. Выражение для целевой функции предлагается дополнить зависимостями и потерей активной мощности в схемах более низкого уровня от напряжений в узлах примыкания. Библ. 3.
- УДК 621.311.012.8.001.24  
Схемы замещения передачи в режиме «два провода — земля». Попов В. А. — «Электричество», 1986, № 4  
Предложено комплексная схема замещения передачи с линией, работающей по схеме «два провода — земля», и схема замещения нулевой последовательности линии при отключении одной из фаз с заземлением ее по концам в общем виде с учетом емкостной проводимости линии, отличающаяся от известных простотой получения и применения. Библ. 6.
- УДК 621.314.228  
Трехфазные трансформаторы с пространственным сердечником и разнесенными обмотками. Козлов М. И., Гершенкроев В. Л., Гордиенко Н. И., Гошуренко В. И. — «Электричество», 1986, № 4  
Описаны трехфазные трансформаторы с пространственно-симметричным сердечником и разнесенными обмотками, первичные из которых расположены на ярмах, соединенных треугольником, а вторичные — на стержнях. Приведены характеристики холостого хода, короткого замыкания и внешние характеристики опытных образцов трансформаторов с различным расположением обмоток высокого и низкого напряжения. Библ. 3.
- УДК 621.316.933.6:537.521.6  
Восстановление электрической прочности газоразрядных промежутков с подвижными электродами после прохождения больших импульсных токов. Павлов В. А., Пичугин Ю. П., Романенко И. Н. — «Электричество», 1986, № 4  
Исследована скорость восстановления электрической прочности (ВЭП) вращающегося разрядника при различных условиях. Показано, что время ВЭП может быть снижено путем быстрого перемещения электродов и принудительного обдува послеразрядного промежутка. Библ. 19.
- УДК 621.315.62.317.7.082.6  
Применение тепловизионного метода для диагностики состояния изоляции высоковольтных конструкций. Гефле О. С. — «Электричество», 1986, № 4  
Предложено использовать тепловизионный метод для определения начальной стадии коронирования изоляторов при выборе параметров внешней и внутренней экранной арматуры. По тепловому контрасту на поверхности испытываемых изделий возможно выявление дефектов порядка 500 мкм при глубине их залегания до 16—17 мм. Библ. 6.
- УДК 62-83-52  
О «фрикционных» автоколебаниях в электроприводах. Клепиков В. Б. — «Электричество», 1986, № 4  
Показано, что в общем случае динамический режим одномассовой электрохимической системы определяется двумя обобщенными параметрами: отношением электрохимической и электромагнитной постоянных времени и отношением жесткости механических характеристик нагрузки и электродвигателя. В пространстве вышеуказанных параметров существует семь областей динамических режимов, среди которых имеется область расходящегося колебательного процесса. При нахождении точки статического равновесия в данной области в разомкнутой системе электропривода с нагрузкой типа пара трения возникают автоколебания. Получены расчетные соотношения, даны рекомендации по устранению указанных автоколебаний. Библ. 10.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Бертинов А. И., Будзко И. А., Веников В. А., Глебов И. А., Евсеев Б. Н. (зам. главного редактора), Ефремов И. С., Иванов-Смоленский А. В., Ильинский Н. Ф., Комельков В. С., Костенко М. В., Лабунцов В. А., Ларионов В. П., Лидоренко И. С., Лизунов С. Д., Мамиконянц Л. Г. (главный редактор), Меерович Э. А., Мучник Г. Ф., Негушил А. В., Сабинин Ю. А., Слезановский О. В., Свалов 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. Хотулева

Сдано в набор 14.02.86 Подписано в печать 04.04.86 Т-07682 Формат 60×90<sup>16</sup>/<sub>8</sub> Печать высокая Усл. печ. л. 10 Усл. кр.-стт. 10,5  
Уч.-изд. л. 13,15 Тираж 5716 экз. Заказ 434

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10 Ордена Трудового Красного Знамени Чеховский полиграфический комбинат ВО «Союзполиграфпром» Государственного комитета СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, г. Чехов Московской области

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru