

ISSN 0013-5380



# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1983

·ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ·

5

КОММУНИЗМ — ЭТО ЕСТЬ СОВЕТСКАЯ ВЛАСТЬ ПЛЮС  
ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ВСЕЙ СТРАНЫ (ЛЕНИН)

ЖУРНАЛ  
ОСНОВАН  
В 1880 Г.

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

5  
1983  
МАЙ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, ГОСУДАРСТВЕННОГО КОМИТЕТА СССР  
ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ, ЦП НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА ЭНЕРГЕТИКИ  
И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
ИМЕНИ АКАДЕМИКА Г. М. КРЖИЖАНОВСКОГО

МОСКВА

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

УДК 621.316.1.018.782.3.001.24

## Расчет нестационарного режима в системе электроснабжения с резкопеременными нагрузками

АРЗАМАСЦЕВ Д. А., ИГУМЕНЩЕВ В. А., САЛАМАТОВ И. А., КОВАЛЕНКО Ю. П.

Свердловск — Магнитогорск

Наличие в системе электроснабжения промышленного предприятия резкопеременных или ударных нагрузок (крупные прокатные станы, электросталеплавильные печи, мощные экскаваторы и др.) вызывает ряд отрицательных эффектов, снижающих качество электроэнергии, подводимой к потребителям. Прежде всего это относится к колебаниям напряжения на шинах и тока в линиях. Кроме того, в режимах с резкопеременными нагрузками происходят колебания роторов синхронных генераторов и электродвигателей, инерционные массы которых активно вовлекаются в электромеханический переходный процесс. Эти колебания отрицательно действуют на работу приводных механизмов, создают опасные механические напряжения в конструктивных элементах турбин, генераторов и электродвигателей. В некоторых случаях не исключается и возможность нарушения устойчивости параллельной работы синхронных машин.

Обычно вопросы расчета режимов с резкопеременными нагрузками остро встают при проектировании новых электротехнологических или прокатных агрегатов, увеличении мощности существующих электродвигателей, при оценке мероприятий по компенсации вредного влияния потребителей с резкопеременной нагрузкой на остальную систему электроснабжения.

В общем случае режимы систем электроснабжения, в которых действуют резкопеременные нагрузки, представляют собой циклические серии переходных процессов. Будем рассматривать режимы, не связанные с нарушением устойчивости параллельной работы синхронных машин. Расчеты таких режимов для многомашинной системы чрезвычайно трудоемки. Задача усложняется еще и потому, что переходный процесс носит длительный характер (до нескольких минут) и принятие обычных допущений (постоянство переходной э. д. с., пренебрежение электромагнитными переходными процессами, активными сопротивлениями элементов сети и др.) может пол-

ностью искажить характер изменения параметров режима во времени. Поэтому для исследования поведения системы с резкопеременными нагрузками целесообразна детальная разработка математической модели генераторов, синхронных электродвигателей, характеристик электрических нагрузок. Следует учитывать регулирование возбуждения синхронных машин, асинхронные моменты, возникающие в демпферных контурах и обмотках возбуждения при качаниях машин.

Методы расчета нестационарных режимов должны быть достаточно просты и эффективны, отражать специфику длительных переходных процессов в многомашинных системах большой размерности с разнородным составом электрических машин. Эти методы должны иметь возможность реализовать математическую модель синхронной машины с необходимой точностью ее проработки, обусловленной конкретной постановкой задачи. При анализе динамических процессов в электрических системах большое значение имеют методы эквивалентирования [1—4]. Однако замещение всей системы электроснабжения одним или несколькими эквивалентными источниками в течение всего длительного переходного процесса неправомерно, так как при этом не учитывается взаимное влияние синхронных машин при их качаниях. Трудно моделировать и регулирование параметров режима в таком эквивалентном источнике. Выделение группы электрически удаленных синфазно движущихся синхронных машин при параметрическом эквивалентировании также не лишено недостатков, так как не имеет надежного критерия в оценке значимости тех или иных характеристик, определяющих поведение машин в переходном процессе. Кроме того, неизбежны значительные алгоритмические трудности из-за неоднозначности выбора объектов эквивалентирования.

Системы электроснабжения крупных промышленных предприятий относятся к системам большой разномер-

© Энергоатомиздат, «Электричество», 1983.

ности. Они включают местные электростанции, десятки синхронных двигателей, многие из которых работают с резкопеременной нагрузкой. В этих условиях важно выбрать такой алгоритм эквивалентирования, который, снижая разномерность системы, в то же время оставляя ее возможность для анализа эффективности мероприятий, намеченных для компенсации влияния ударных нагрузок.

Сущность метода последовательного эквивалентирования, впервые использованного для расчета оптимального распределения реактивной мощности, изложена в [5]. В настоящей статье этот метод имеет следующие особенности.

Начальные условия системы электроснабжения задаются в результате расчета потокораспределения в исходном режиме. При этом определяются потоки мощности во всех элементах с учетом потерь, уровни напряжения, э. д. с. машин и углы между их роторами.

В связной электрической сети, имеющей иерархическую структуру, всегда можно выделить элементарную схему, изображенную на рис. 1, содержащую источник питания (генератор, синхронный двигатель) или нагрузку.

Заменим нагрузку эквивалентной проводимостью [2]:

$$y_n = \hat{S}_n / \dot{U}_1^2 \quad (1)$$

и приведем элементарную схему к общему виду (рис. 2). Очевидно, что для схемы с пассивной нагрузкой должны выполняться условия:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_0 &= 0; \\ z &= z_n + 1/y_n \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Если две элементарные схемы присоединены к одному узлу расчетной схемы, можно выполнить эквивалентное преобразование, поставив им в соответствие одну схему такого же вида, имеющую характеристики [2]:

$$z_0 = \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2}; \quad (3)$$

$$\dot{E}_0 = z_0 \left( \frac{\dot{E}_1}{z_1} + \frac{\dot{E}_2}{z_2} \right). \quad (4)$$

На следующем шаге эквивалентирования вновь сформированная эквивалентная схема рассматривается как элементарная, которую можно объединить с одной из схем, принадлежащих к тому же узлу. Таким образом, на каждом шаге эквивалентирования количество переменных, в роли которых выступают потоки мощности в синхронных машинах, уменьшается на единицу. Когда

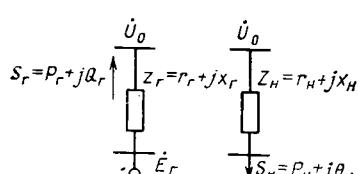


Рис. 1

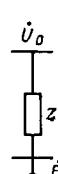


Рис. 2

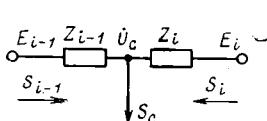


Рис. 3

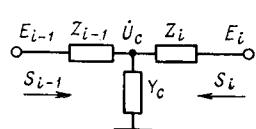


Рис. 4

все элементы одного узла эквивалентированы, результирующие э. д. с. и сопротивление формируют одну из элементарных схем узла более высокого уровня иерархии.

Свертывание схемы в прямом ходе продолжается до верхнего уровня, которым обычно служит узел связи с энергосистемой. Решение задачи, т. е. определение потоков мощности источников и их э. д. с. находится в обратном ходе. Для развертывания схемы используется элементарная схема, изображенная на рис. 3.

Поток  $S_c$  осуществляет функциональную связь между соседними по вертикали уровнями эквивалентирования. На самом верхнем уровне поток  $S_c$  определяется при расчете потокораспределения, а для последующих расчетов — как поток эквивалентного источника, получающийся при развертывании схемы.

Для распределения потоков мощности между источниками рассматривается двухмашинная система, изображенная на рис. 4, где поток  $S_c$  замещен эквивалентной проводимостью.

Собственные и взаимные сопротивления относительно источников можно определить из следующих выражений:

$$z_{11} = \frac{z_i}{1 + z_i y_c} + z_{i-1}; \quad (5)$$

$$z_{22} = \frac{z_{i-1}}{1 + z_{i-1} y_c} + z_i; \quad (6)$$

$$z_{12} = z_i + z_{i-1} + z_i z_{i-1} y_c. \quad (7)$$

Мощности, разнесенные на источники узла [1]:

$$S_{i-1} = \dot{E}_{i-1} \left( \frac{\hat{E}_{i-1}}{\hat{z}_{11}} - \frac{\hat{E}_i}{\hat{z}_{12}} \right); \quad (8)$$

$$S_i = \dot{E}_i \left( \frac{\hat{E}_i}{\hat{z}_{22}} - \frac{\hat{E}_{i-1}}{\hat{z}_{12}} \right). \quad (9)$$

Таким образом, в обратном ходе решения определяются параметры режима (потоки, э. д. с., напряжения) во всех элементах. В формулах эквивалентирования (3), (4) и развертывания схемы (8), (9) естественным образом учитываются потери мощности. Для исходного режима, выполняемого при неизменных нагрузках сети, результаты расчетов, полученные приведенным выше способом и обычным расчетом потокораспределения, совпадают. Углы между роторами синхронных машин и вектором напряжения энергосистемы неизменны и определяются как

$$\delta_i = \arctg \frac{\text{Im } \dot{E}_i}{\text{Re } \dot{E}_i}. \quad (10)$$

Если заменить нагрузки в одном или нескольких узлах, изменятся собственные и взаимные сопротивления, определяемые на каждом уровне формулами (5)–(7). Произойдет перераспределение электромагнитных мощностей между источниками, в то время как механические моменты останутся неизменными. Начнется переходный процесс, описываемый дифференциальными уравнениями движения. Численное интегрирование уравнений электромеханических и электромагнитных переходных процессов производится методом последовательных интервалов [1]. К особенностям в использовании этого метода в настоящей статье относится то, что на каждом временном интервале в заданных узлах изменяются активные и реактивные нагрузки, производится эквивалентирование и развертывание расчетной схемы,

которая, как было показано выше, сводит решение задачи к расчету двухмашинной системы на каждом уровне эквивалентирования. При этом предлагаемый метод не накладывает каких-либо ограничений на глубину проработки математической модели синхронной машины, которая может быть представлена уравнениями Парка — Горева с различной степенью их упрощения, обычно используемых для расчетов в двухмашинной системе.

В конце временного интервала каждая синхронная машина, входящая в расчетную схему, представлена следующими характеристиками: синхронной и асинхронной электромагнитной мощностью, механической мощностью на валу, э. д. с. машины, потоками активной и реактивной мощности, выдаваемой в сеть или потребляемой из сети, углом между ротором и напряжением балансирующего узла и скоростью его изменения. Перед очередным циклом эквивалентирования вводится коррекция на значения э. д. с. и механический момент, отражающая действия системы регулирования возбуждения и механического момента на валу машины.

Электрические нагрузки приемников с резкопеременным режимом работы задаются в виде графиков активной и реактивной мощности, полученных в результате осциллографирования в характерных технологических циклах их работы. Одновременно можно учитывать переменные нагрузки одного или нескольких электроприемников. При необходимости электрические нагрузки сети могут быть представлены в виде статических характеристик в функции напряжения и других параметров, определяемых технологией производства.

При достаточно малом интервале времени (в расчетах принималось  $\Delta t=0,01$  с) погрешности, возникающие при эквивалентном представлении сети, получаются небольшими, очень четко прослеживается взаимное влияние синхронных машин при их несининфазных качаниях.

Рассмотрение полной математической модели синхронной машины из-за ее большого объема и сложности выходит за рамки данной статьи. Поэтому в качестве иллюстрации рассмотрим упрощенную математическую модель, которая достаточно полно отражает принципы предлагаемого подхода и в основном отвечает требованиям к расчету нестационарного режима в системе электроснабжения промышленного предприятия. Программа НЕСТА, реализующая описанный алгоритм, составлена на языке ФОРТРАН IV. На ЦВМ ЕС 1020 допускается расчет систем электроснабжения, содержащих более ста элементов, т. е. может учитываться одновременно несколько десятков синхронных машин.

Для примера приводятся результаты расчета нестационарного режима, обусловленного резкопеременными нагрузками в узле электроснабжения, показанного на рис. 5. Узел содержит два генератора местной электростанции мощностью 12 и 30 МВт, два синхронных двигателя насосных агрегатов мощностью 2,9 МВ·А и один синхронный двигатель турбокомпрессора 12 МВ·А. Узел связан с энергосистемой бесконечной мощности через трансформатор 40 МВ·А. Приемник электроэнергии с резкопеременной нагрузкой задан графиками изменения активной и реактивной мощности на его зажимах.

Рассматривается режим при больших возмущениях и малых изменениях скорости синхронных машин. Уравнение движения роторов для каждой машины [1]:

$$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{\text{пр}} - P_{\text{ac}} - P_{\text{s}}, \quad (11)$$

$T_J$  — механическая постоянная инерции агрегата;  $\delta$  —

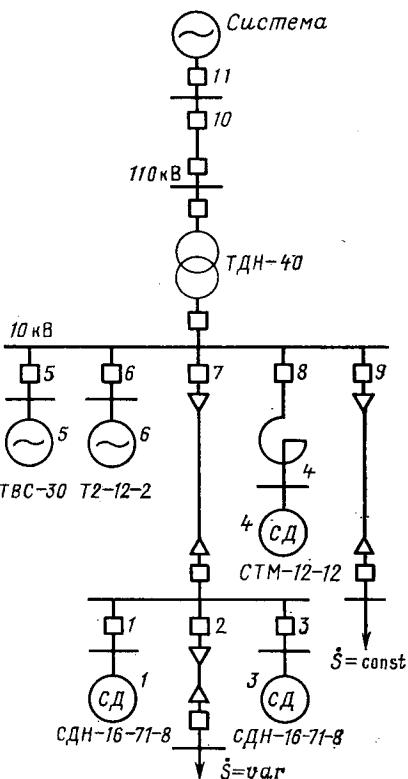


Рис. 5

угол между ротором синхронной машины и напряжением балансирующего узла;  $P_{\text{пр}}$  — мощность турбин (генератора) или приводного механизма (для электродвигателей);  $P_{\text{ac}}$  — асинхронная составляющая электромагнитной мощности, обусловленная качаниями машины;  $P_{\text{s}}$  — синхронная составляющая электромагнитной мощности синхронной машины.

Будем считать в данном случае мощность турбины приводных механизмов двигателей неизменными. Электромагнитная мощность на каждом интервале времени определяется по формулам (8), (9), асинхронную мощность можно выразить следующим образом [4]:

$$P_{\text{ac}} = \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{-\Delta\delta}{314\Delta t} T_d' \sin^2\delta, \quad (1)$$

где  $U$  — напряжение на зажимах машины;  $x_d'$ ,  $x_d$  — переходное и синхронное сопротивления по продольной оси;  $T_d'$  — переходная постоянная времени обмотки возбуждения по продольной оси.

В конце каждого интервала времени определяют приращения углов  $\Delta\delta_i$  и абсолютные значения углов  $\delta_i$  [1]. Причем для первого интервала

$$\Delta\delta_i = k \frac{\Delta P}{2}. \quad (1)$$

Для последующих интервалов

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + k \Delta P_{n-1}, \quad (1)$$

где

$$k = \frac{1800\Delta t^2}{T_J}. \quad (1)$$

В начале следующего интервала

$$\delta_n = \delta_{n-1} + \Delta\delta_n. \quad (1)$$

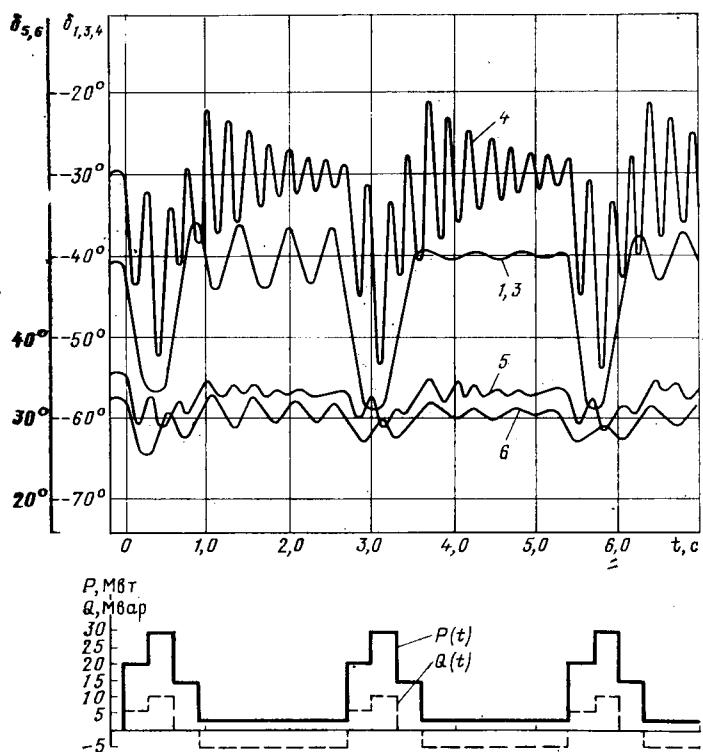


Рис. 6

Э. д. с.  $E_q$  генераторов на каждом интервале определяется при расчете потокораспределения.

Для регулируемой неявнополюсной машины э. д. с. генератора

$$E_q = E_{q0} + k_I (I_d - I_{d0}), \quad (17)$$

где  $E_{q0}$ ,  $I_{d0}$  — э. д. с. и ток генератора в исходном режиме;  $I_d$  — продольная составляющая тока статора в конце интервала времени;  $k_I$  — коэффициент компаундирования по току.

Синхронные двигатели вводятся в расчетную схему фиктивной машины с одинаковыми сопротивлениями в продольной и поперечной осях. Ее э. д. с.  $E_q$  приложена за сопротивлением  $x_d$  и совпадает по направлению с вектором фиктивной э. д. с.  $E_Q$ . Расчет э. д. с. ведется по формулам [1]:

$$E_q = E_Q \frac{x_d - x'_d}{x_q - x'_d} - E'_q \frac{x_d - x_q}{x_q - x'_d}; \quad (18)$$

$$E_Q = E'_q + \sqrt{3} I_d (x_q - x'_d). \quad (19)$$

где  $x_q$  — синхронное сопротивление по поперечной оси.

На рис. 6 приведены графики изменения углов между роторами синхронных двигателей (кривые 1, 3, 4) и генераторов (кривые 5, 6) и напряжением балансирующего узла (11 на рис. 5) при изменении нагрузки, за-

данной графиком. Аналогично этим графикам по результатам расчетов можно построить графики изменения напряжения во всех точках сети, активной и реактивной мощности для каждого элемента.

Практические расчеты нестационарных режимов выполнены в системе электроснабжения Магнитогорского металлургического комбината. В связи с реконструкцией главных приводов обжимных станов, предусматривающей увеличение их единичных мощностей с 11 до 20 МВт·А, возникли вопросы допустимости работы приводных двигателей от шин местной электростанции по условиям влияния их резкопеременной нагрузки на остальную часть заводской системы электроснабжения. В расчет нестационарного режима включен узел, содержащий 7 генераторов с номинальной мощностью от 12 до 60 МВт и более 100 синхронных двигателей напряжением 3; 6; 10 кВ. Исследованы режимы при работе существующих приводов, которые показали достаточно близкое приближение расчетных параметров к реальным.

Расчеты режимов после реконструкции учитывали утяжеленные варианты связи с энергосистемой (отключение двух трансформаторов связи), была принята во внимание также возможность совпадения циклов прокатки одновременно на двух обжимных станах. Полученные графики качания роторов синхронных двигателей и генераторов, колебаний напряжения и мощности позволили сделать заключение о недопустимых качаниях роторов и нарушении устойчивости сильно нагруженных двигателей 3; 6; 10 кВ в утяжеленных режимах уже в конце второго пропуска заготовок в цикле прокатки.

Результаты расчетов подтвердили необходимость перевода питания двигателей главных приводов обжимных станов на подстанцию глубокого ввода и были использованы при выполнении проекта реконструкции системы электроснабжения блюминга, разработанного Магнитогорским отделением Гипромеза.

**Вывод.** Метод последовательного эквивалентирования в сочетании с методом последовательных интервалов позволяет сравнительно просто и алгоритмически удобно проводить расчеты нестационарных режимов в сложных многомашинных системах, исследовать влияние резкопеременных нагрузок на параметры режима, анализировать эффективность мероприятий по устранению отрицательного воздействия резкопеременных нагрузок.

#### Список литературы

1. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. — М.: Высшая школа, 1978.
2. Жуков Л. А., Стратан И. П. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем. — М.: Энергия, 1979.
3. Воропай Н. И. Упрощение математических моделей динамики электроэнергетических систем. — Новосибирск: Наука, 1981.
4. Гусейнов Ф. Г. Упрощение расчетных схем электрических систем. — М.: Энергия, 1978.
5. Арзамасцев Д. А., Игуменцев В. А. Расчет оптимального распределения реактивной мощности методом последовательного эквивалентирования. — Электричество, 1976, № 1.

[22.09.82]



# Пофазная коррекция токов в сети с нулевым проводом при случайном характере их изменения

ШИДЛОВСКИЙ А. К., член-корр. АН УССР,

КУЗНЕЦОВ В. Г., доктор техн. наук

Институт электродинамики АН УССР

Одним из главных факторов, ухудшающих качество электроэнергии в низковольтных коммунально-бытовых электрических сетях, является неуравновешенность напряжений, обусловленная несимметричным и нелинейным характером потребителей и приводящая к значительным дополнительным отклонениям напряжений на зажимах потребителей [1—3]. Весьма велики, в частности, потери напряжения и мощности, обусловленные составляющими напряжений и токов нулевой последовательности, в низковольтных линиях, питающих многоэтажные дома с однофазными электроплитами.

В настоящей статье рассматривается способ симметрирования токов, заключающийся в оптимальном распределении изменяющихся по случайному закону нагрузок фаз. В отличие от известных способов, связанных с использованием корректирующих устройств [4 и 5] и перераспределением нагрузок вручную, его применение позволяет существенно снизить потери электроэнергии и повысить ее качество за счет эффективной минимизации токов обратной и нулевой последовательностей.

Предположим, что к питающей линии с сопротивлением фазного и нулевого проводов  $Z_L$  и  $Z_L^0$  подключены нагрузка  $Y_{1H}$ ,  $Y_{2H}$ ,  $Y_{3H}$  и корректирующая нагрузочная отпайка  $\Delta Y_H$ . Последняя подключается при помощи коммутаторов  $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$  к той из фаз, которая в рассматриваемый период времени является минимальной загруженной (см. рисунок).

В качестве корректирующей нагрузочной отпайки могут быть выбраны, например, несколько квартир многоэтажного дома, однофазное ответвление магистрали и т. д. Полагая, что система питающих напряжений симметрична, а коэффициент мощности нагрузок фаз одинаковый, запишем выражение для модуля тока в нулевом проводе:

$$\alpha = \frac{I_0 z_L}{U} = \sqrt{A - B}, \quad (1)$$

где

$$A = \sum_{i=1}^3 \left( \frac{y_{iH} + \operatorname{sgn} y_i \Delta y_H}{y_{iH} + \operatorname{sgn} y_i \Delta y + y_n} \right)^2; \quad (2)$$

$$B = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{(y_{iH} + \operatorname{sgn} y_i \Delta y_H)(y_{jH} + \operatorname{sgn} y_j \Delta y_H)}{(y_{iH} + \operatorname{sgn} y_i \Delta y_H + y_n)(y_{jH} + \operatorname{sgn} y_j \Delta y_H + y_n)}. \quad (2)$$

Здесь

$$\operatorname{sgn} y_{iH} = \begin{cases} 1 & \text{для минимального } y_{iH}; \\ -1 & \text{для максимального } y_{iH}; \\ 0 & \text{для среднего } y_{iH}. \end{cases}$$

Рассмотрим (1) для случая, когда

$$y_{1H} < y_{3H} < y_{2H}. \quad (3)$$

Возводя обе части уравнения (1) в квадрат и полагая что  $y_n \gg y_{iH}$ , получим

$$\alpha^2 \approx \frac{1}{y_n^2} [(y_{1H} + \Delta y_H)^2 + (y_{2H} - \Delta y_H)^2 + y_{3H}^2 - (y_{1H} + \Delta y_H)(y_{2H} - \Delta y_H) - (y_{1H} + \Delta y_H)y_{3H} - (y_{2H} - \Delta y_H)y_{3H}]. \quad (4)$$

В случае, когда корректирующая отпайка отсутствует ( $\Delta y_H = 0$ ),

$$\alpha_0^2 \approx \frac{1}{y_n^2} (y_{1H}^2 + y_{2H}^2 + y_{3H}^2 - y_{1H}y_{2H} - y_{2H}y_{3H} - y_{3H}y_{1H}). \quad (5)$$

Одним из условий выбора  $\Delta y_H$  является

$$\alpha^2 < \alpha_0^2 \text{ или } \alpha^2 - \alpha_0^2 < 0. \quad (6)$$

Из (4) — (6) находим, что при выполнении (3)

$$\Delta y_H < y_{2H} - y_{1H}. \quad (6)$$

Таким образом, порог срабатывания устройства срабатывания должен быть несколько больше  $\Delta y_H$ , определяемого из (7).

Взяв частную производную от  $\alpha^2$  по  $\Delta y_H$  и приравняв ее нулю, получим значение  $\Delta y_H$ , обеспечивающее при заданных  $y_{1H}$  и  $y_{2H}$  минимальное значение тока в нулевом проводе:

$$\Delta y_H = \frac{y_{2H} - y_{1H}}{2}. \quad (7)$$

В реальных условиях  $y_{iH}$  являются независимыми случайными величинами, и поэтому расчетное значение  $\Delta y_H$  при  $M[\alpha^2] = \min$  следует принимать равным

$$\Delta y_H = \frac{1}{2} (M_y[y_{2H}] - M_y[y_{1H}]). \quad (8)$$

Здесь через  $M_y[y_{1H}]$  и  $M_y[y_{2H}]$  обозначены условные математические ожидания случайных величин  $y_{1H}$ ,  $y_{2H}$  определяемые из выражений:

$$M_y[y_{1H}] = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} y_{1H} f(y_{1H}/y_{2H}, y_{3H}) dy_{1H}}{\int_{-\infty}^{\infty} f(y_{1H}/y_{2H}, y_{3H}) dy_{1H}}, \quad (9)$$

$$M_y[y_{2H}] = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} y_{2H} f(y_{2H}/y_{1H}, y_{3H}) dy_{2H}}{\int_{-\infty}^{\infty} f(y_{2H}/y_{1H}, y_{3H}) dy_{2H}}. \quad (10)$$

Найдем условные плотности вероятности  $f(y_{1H}/y_{2H}, y_{3H})$  и  $f(y_{2H}/y_{1H}, y_{3H})$ . Плотность вероятности  $f(y_{1H}/y_{3H})$  величины  $y_{1H}$  при условии  $y_{1H} < y_{3H}$  выражается через произведение плотности вероятности  $f(y_{3H})$  на вероят-

юсть значений  $y_{2n}$ , больших  $y_{1n}$  [6]:

$$f(y_{1n}/y_{3n}) = f(y_{1n}) \int_{y_{1n}+\Delta}^{\infty} f(y_{3n}) dy_{3n}, \quad (11)$$

де  $\Delta$  — малая величина.

Плотность вероятности  $f(y_{3n}/y_{2n})$  величины  $y_{3n}$  при условии  $y_{3n} < y_{2n}$  выражается через произведение плотности вероятности  $f(y_{3n})$  на вероятность  $y_{2n}$ , больших  $y_{3n}$ :

$$f(y_{3n}/y_{2n}) = f(y_{3n}) \int_{y_{3n}+\Delta}^{\infty} f(y_{2n}) dy_{2n}. \quad (12)$$

С учетом (11) и (12) получим

$$f(y_{1n}/y_{3n}, y_{2n}) = f(y_{1n}) \int_{y_{1n}+\Delta}^{\infty} f(y_{3n}/y_{2n}) dy_{3n} =$$

$$= f(y_{1n}) \int_{y_{1n}+\Delta}^{\infty} f(y_{3n}) \int_{y_{3n}+\Delta}^{\infty} f(y_{2n}) dy_{2n} dy_{3n};$$

$$(y_{2n}/y_{3n}, y_{1n}) = f(y_{2n}) \int_{-\infty}^{y_{2n}+\Delta} f(y_{3n}) \int_{-\infty}^{y_{3n}+\Delta} f(y_{1n}) dy_{1n} dy_{3n}.$$

Если принять для  $y_{in}$  равномерное распределение

$$f(y_{in}) = \begin{cases} \frac{1}{2a_i} & \text{при } |y_{in} - m_i| < a_i; \\ 0 & \text{при } |y_{in} - m_i| > a_i, \end{cases}$$

о условные плотности вероятности

$$(y_{1n}/y_{3n}, y_{2n}) = f(y_{1n}) \int_{y_{1n}+\Delta}^{m_3+a_3} f(y_{3n}) \int_{y_{3n}+\Delta}^{m_2+a_2} f(y_{2n}) dy_{2n} dy_{3n} =$$

$$= f(y_{1n}) \frac{1}{4a_2 a_3} \left\{ (m_2 + a_2 - \Delta)(m_3 + a_3 - y_{1n} - \Delta) - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} [(m_3 + a_3)^2 - (y_{1n} + \Delta)^2] \right\}. \quad (13)$$

$$(y_{2n}/y_{3n}, y_{1n}) = f(y_{2n}) \int_{m_3-a_3}^{y_{2n}+\Delta} f(y_{3n}) \int_{m_1-a_1}^{y_{3n}+\Delta} f(y_{1n}) dy_{1n} dy_{3n} =$$

$$= f(y_{2n}) \frac{1}{4a_1 a_3} \left\{ (\Delta - m_1 + a_1)(y_{2n} + \Delta - m_3 + a_3) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} [(y_{2n} + \Delta)^2 - (m_3 - a_3)^2] \right\}. \quad (14)$$

Подставив (13) и (14) в (10) и принимая во внимание (9), найдем выражение для оптимального значения проводимости корректирующей нагрузочной отпайки:

$$\Delta y_n = \frac{1}{2} \left[ \begin{array}{l} \int_{m_1-a_1}^{-m_1+a_1} y_{1n} f(y_{1n}/y_{3n}, y_{2n}) dy_{1n} \\ \hline \int_{m_1-a_1}^{m_1+a_1} f(y_{1n}/y_{3n}, y_{2n}) dy_{1n} \\ \hline \int_{m_2-a_2}^{m_2+a_2} y_{2n} f(y_{2n}/y_{3n}, y_{1n}) dy_{2n} \\ \hline \int_{m_2-a_2}^{m_2+a_2} f(y_{2n}/y_{3n}, y_{1n}) dy_{2n} \end{array} \right]. \quad (15)$$

Подставляя в (15) известные значения  $m_i$ ,  $a_i$  можно получить точное значение  $\Delta y_n$ .

Если принять, что  $y_{in}$  являются независимыми нормально-распределенными случайными величинами с математическими ожиданиями  $M[y_{in}] = m_i$  и дисперсиями  $D[y_{in}] = \sigma_i^2$ , то условные плотности вероятности:

$$f(y_{1n}/y_{3n}, y_{2n}) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y_{1n}-m_1)^2}{2\sigma_1^2}} \int_{y_{1n}+\Delta}^{\infty} \frac{1}{\sigma_3 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y_{3n}-m_3)^2}{2\sigma_3^2}} \times \\ \times e^{-\frac{(y_{2n}-m_2)^2}{2\sigma_2^2}} \int_{y_{3n}+\Delta}^{\infty} \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y_{2n}-m_2)^2}{2\sigma_2^2}} dy_{2n} dy_{3n};$$

$$f(y_{2n}/y_{3n}, y_{1n}) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y_{2n}-m_2)^2}{2\sigma_2^2}} \int_{-\infty}^{y_{2n}+\Delta} \frac{1}{\sigma_3 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y_{3n}-m_3)^2}{2\sigma_3^2}} \times \\ \times e^{-\frac{(y_{1n}-m_1)^2}{2\sigma_1^2}} \int_{-\infty}^{y_{1n}+\Delta} \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y_{1n}-m_1)^2}{2\sigma_1^2}} dy_{1n} dy_{3n}.$$

Непосредственное вычисление с помощью этих выражений функций плотности вероятности и математических ожиданий, входящих в (9) и (10), представляется весьма затруднительным. Значительно проще определить оптимальное значение  $\Delta y_n$  при помощи статистического моделирования.

Предположим, что имеется выборка значений  $y_{1n}$ ,  $y_{2n}$ ,  $y_{3n}$ , цензурированная в соответствии с (3). Тогда  $j$ -е значение  $\bar{\alpha}^2$ , соответствующее этой выборке,

$$\bar{\alpha}_j^2 = \frac{1}{y_{1j}^2} [y_{1n}^2 + y_{2n}^2 + y_{3n}^2 - y_{1nj} y_{2nj} - y_{2nj} y_{3nj} - \\ - y_{3nj} y_{1nj} + 3\Delta y_n (\Delta y_n + y_{1nj} - y_{2nj})].$$

Найдем среднее значение  $\bar{\alpha}^2$  цензурированной выборки:

$$\bar{\alpha}^2 = \frac{1}{n} \sum \bar{\alpha}_j^2 = \frac{1}{y_{1n}^2} \left[ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{1nj}^2 + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{2nj}^2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{3nj}^2 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{1nj} y_{2nj} - \right. \\ \left. - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{2nj} y_{3nj} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{3nj} y_{1nj} + \right. \\ \left. + 3\Delta y_n \left( \Delta y_n + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{1nj} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{2nj} \right) \right]. \quad (16)$$

Критерием выбора оптимального значения  $\Delta y_n$  является  $\min(\bar{\alpha}^2)$ . Используя условие  $\partial(\bar{\alpha}^2)/\partial\Delta y_n = 0$ , получим

$$\Delta y_{n,\text{опт}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{2nj} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{1nj} \right) = \\ = \frac{1}{2} (\bar{y}_{2n} - \bar{y}_{1n}), \quad (17)$$

где  $\bar{y}_{1n}$ ,  $\bar{y}_{2n}$  — средние значения цензурированной выборки.

Задача определения значения  $\Delta y_{n,\text{опт}}$  и эффективности введения коррекции может быть решена при помощи статистического моделирования следующим образом.

1. В соответствии с заданными значениями математического ожидания и дисперсии генерируются три независимые последовательности нормально-распределенных случайных чисел, которые имитируют мгновенные значения  $y_{1n}$ ,  $y_{2n}$ ,  $y_{3n}$ .

2. Из полученных сочетаний значений  $y_{1n}$ ,  $y_{2n}$ ,  $y_{3n}$  выбираются такие, для которых выполняется условие (3).

3. Для цензурированной выборки значений  $y_{1n}$ ,  $y_{2n}$ ,  $y_{3n}$  вычисляются в соответствии с (5) значения

$$\alpha_{01}^2, \alpha_{02}^2, \dots, \alpha_{0n}^2, \text{ а затем } \bar{\alpha}_0^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \alpha_j^2.$$

4. Определяются выборочные средние  $\bar{y}_{1n}$ ,  $\bar{y}_{2n}$ , а из (10) — оптимальное значение  $\Delta y_{n, \text{опт}}$ .

5. Цензурированная выборка нагрузочных проводимостей подвергается коррекции в соответствии со следующим алгоритмом:

5.1. Значения  $y_{1n}$  представляются в вид

$$y_{1nj} + (1 - \text{sgn } y_{2n}) \Delta y_n.$$

5.2. Значения  $y_{2n}$  представляются в виде

$$y_{2nj} - \Delta y_n + \Delta y_n \text{ sgn } y_{2n},$$

где

$$\text{sgn } y_{2n} = \begin{cases} 1, & \text{если } y_{2nj} - y_{1nj} \leq \Delta y_n; \\ 0, & \text{если } y_{2nj} - y_{1nj} > \Delta y_n. \end{cases}$$

5.3. Если  $\text{sgn } y_{2n} = 1$ , то значение  $\alpha_{0j}^2$  остается без изменения, если  $\text{sgn } y_{2n} = 0$ , то значение  $\alpha_j^2$  определяется в соответствии с (4).

6. Для откорректированной выборки определяется значение

$$\bar{\alpha}_k^2 = \frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^{n_1} \alpha_{0j}^2 + \sum_{j=1}^{n_2} \alpha_j^2 \right); \quad n_1 + n_2 = n,$$

где  $n_1$  — число случаев, когда значения  $y_{1n}$  и  $y_{2n}$  остаются без изменения;  $n_2$  — число случаев, когда вводится корректирующая проводимость  $\Delta y_n$ .

7. Эффективность введения корректирующей отпайки оценивается с помощью коэффициентов  $\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$ , характеризующих уменьшение второго момента и математического ожидания тока нулевой последовательности:

$$\vartheta_1 = 1 - \frac{\bar{I}_{0K}^2}{\bar{I}_0^2}; \quad \vartheta_2 = 1 - \frac{I_{0K}}{\bar{I}_0},$$

где  $I_0$ ,  $I_{0K}$  — значения тока в нулевом проводе без коррекции и с коррекцией режима.

В соответствии с приведенным алгоритмом на языке ФОРТРАН разработана программа статистического моделирования. Проведенные на ЦВМ М4030 расчеты по-

казали, что при введении оптимальной нагрузочной отпайки  $\Delta y_{n, \text{опт}}$  среднее значение квадрата тока в нулевом проводе уменьшается в 3—10 раз.

Необходимо отметить, что ввиду недостаточной априорной информации о распределении плотностей вероятности нагрузочных проводимостей при теоретическом анализе процесса коррекции токов были рассмотрены два крайних из возможных распределений — равномерное и нормальное. При других законах распределения математический аппарат анализа, приведенный свыше, остается в силе. Изменится лишь подпрограмма генерации случайных чисел в соответствии с заданным законом распределения.

На основе предложенного способа в Институте электродинамики АН УССР разработана опытная партия тиристорных переключателей нагрузок (ТПН), установленных на вводах многоэтажных домов г. Севастополя (ПЭО «Крымэнерго»). Принцип работы ТПН заключается в следующем. Вначале корректирующая отпайка  $\Delta y_{n, \text{опт}}$ , выбранная из состава нагрузки в соответствии с вышеупомянутыми рекомендациями, подключается на равные промежутки времени к фазам сети (режим «Цикл»). При этом фиксируются значения тока нулевой последовательности ( $I^0$ ). Затем  $\Delta y_{n, \text{опт}}$  подключается в положение, обеспечивающее минимальное значение  $I^0$ . Этот режим продолжается до тех пор, пока значение тока нулевой последовательности не выйдет за пределы допустимого изменения. В этом случае схемой выдержки времени ТПН вновь переводится в режим «Цикл», определяется минимальное значение  $I^0$ , и далее процесс повторяется.

Точность симметрирования составляет менее 0,5 А. Потребляемая мощность блока управления составляет 15 Вт. Эксплуатация ТПН в действующих электрических сетях подтвердила их высокую эффективность и надежность. Экономический эффект от внедрения одного устройства составляет в среднем 1000 руб. в год.

#### Список литературы

- Афанасьева Е. И., Тударовский Я. Л. Бытовые электроаппараты как источники искажения в сетях 0,4 кВ. — ЭП Бытовая электротехника, 1979, вып. 3.
- Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях. — М.: Энергия, 1977.
- Левин М. С., Мурдян А. Е., Сырых Н. Н. Качество электроэнергии в сетях сельских районов. — М.: Энергия, 1975.
- Электротехническое оборудование для обеспечения качества электрической энергии / И. М. Бортник, В. В. Худяков, В. Н. Ивакин и др. — Электротехника, 1981, № 3.
- Кузнецов В. Г. Устройства повышения качества электроэнергии в низковольтных сетях с нулевым проводом. — Электротехнико-техническое, 1978, № 10.
- Коротков В. П., Тайц Б. А. Основы метрологии и теории точности измерительных устройств. — М.: Изд-во стандартов, 1978.

[26.05.8]



# Моделирование колебательных процессов в валопроводе турбоагрегата

УРУСОВ И. Д., доктор техн. наук

г. Истра

Увеличение единичных мощностей электрических машин с перспективой применения сверхпроводящих обмоток вызывает существенные качественные и количественные изменения в протекании электромеханических процессов. Возникает ряд новых не известных ранее явлений, таких как повышенные электромагнитные моменты при отключении от сети синхронных машин, подсинхронный резонанс при работе синхронных генераторов на ВЛ, содержащие продольно-емкостную компенсацию, параметрический резонанс при асинхронном ходе генератора [1 и 2], гамма-колебательный процесс [3], обусловленный совместным действием синхронизирующего момента генератора и упругих сил валопровода.

Указанные явления послужили в разной мере причиной серьезных повреждений агрегатов, и для их исследования оказалось необходимым совместное рассмотрение в рамках одной математической или физической модели процессов электромагнитного и упруго-механического характера с учетом соответствующих диссипативных функций. Иначе говоря, исследование потребовало системного подхода и в связи с этим возникшей необходимости дальнейшего развития принципов моделирования. Возник вопрос о необходимости систем контроля и регистрации крутильных моментов в условиях эксплуатации, вопрос, который явился предметом обсуждения на семинарах, научных советах, международных конференциях и в печати [4 и 6]. Основные требования к моделям, вытекающие из этого, можно свести к следующему:

исходя из системного подхода, модель должна быть комплексной и учитывать совокупность разнородных физических факторов, позволяющих выявить основные качественные и количественные закономерности новых явлений с необходимой и достаточной степенью точности;

критерии подобия в электромеханике, в выборе которых теория подобия допускает известную свободу [5], должны быть простыми и физически содержательными; они должны позволить непосредственное их использование как для анализа процесса, так и для синтеза параметров, обеспечивающих заданные характеристики процесса.

В статье на примере системы валопровода турбоагрегата с многими степенями свободы и сложным обменом энергией между тепловой, механической и электромагнитной частями установки показана возможность и целесообразность реализации в модели указанных выше условий.

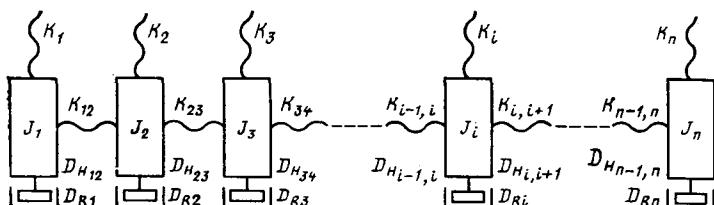


Рис. 1

**Основные соотношения.** Для вывода уравнений взаимосвязанного электромагнитного, упруго-механического и диссипативного процесса валопровода турбоагрегата (рис. 1) используем 2-ю форму уравнений Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial q_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = Q_i - \frac{\partial F}{\partial q_i}. \quad (1)$$

Подставляя в них выражения кинетической  $T$ , потенциальной  $U$  и диссипативной  $F$  энергий, в каждое из которых входят их электромагнитные и механические эквиваленты:

$$T = T_e + T_m = \frac{1}{2} \left[ \sum_{i=1}^s i_i \psi_i + \sum_{i=s+1}^m J_i \dot{\theta}_i^2 \right]; \quad (2)$$

$$U = U_e + U_m = \frac{1}{2} \left[ \sum_{i=1}^s c_i u_i^2 + \sum_{i=s+1}^m k_{i-1,i} (\theta_i - \theta_{i-1})^2 \right]; \quad (3)$$

$$F = F_e + F_m = \frac{1}{2} \left[ \sum_{i=1}^s t_i^2 r_i + \sum_{i=s+1}^m D_{H,i-1,i} (\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{i-1})^2 + D_{R,i} \dot{\theta}_i^2 \right]; \quad (4)$$

получим после преобразований систему дифференциальных уравнений 2-го порядка типа:

$$J_i \ddot{\theta}_i + D_{R,i} \dot{\theta}_i + D_{H,i-1,i} (\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{i-1}) + D_{H,i,i+1} (\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{i+1}) + K_{i-1,i} (\theta_i - \theta_{i-1}) + K_{i,i+1} (\theta_i - \theta_{i+1}) = \Delta M_i(t), \quad (5)$$

где  $D$  и  $K$  — соответственно коэффициенты диссипации и упругости, или в матричной форме:

$$A \ddot{\theta} + B \dot{\theta} + C \theta = \Delta M(t). \quad (6)$$

Здесь  $\theta$  — матрица-столбец колебаний угла  $\theta$ :

$$A = \begin{vmatrix} J_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & J_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & J_3 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & J_n \end{vmatrix} \quad (7)$$

— диагональная матрица моментов инерции роторов;

$$B = \begin{vmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \boxed{-D_{H,i-1,i}} & \boxed{D_{H,i-1,i} + D_{R,i} + D_{H,i,i+1}} & \boxed{-D_{H,i,i+1}} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{vmatrix} \quad (8)$$

— трехдиагональная матрица коэффициентов диссипации;

$$C = \begin{vmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \boxed{-K_{i-1,i}} & \boxed{K_{i-1,i} + K_i + K_{i,i+1}} & \boxed{-K_{i,i+1}} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{vmatrix} \quad (9)$$

— трехдиагональная матрица квазиупругих коэффициентов;

$\Delta M(t)$  — матрица-столбец внешних возмущений.

Поясним принятую в матрицах  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  и  $\Delta M$  индексацию. Одинарная индексация (например,  $D_{Ri}$ ,  $K_i$ ) относится к внешним силам демпфирования и упругости, действующим на ротор. Это демпферные и синхронизирующие моменты в электрических роторах и силы торможения в лопаточном аппарате турбин от движения в паровом объеме. Двойные индексы (например,  $D_{H,i-1,i}$  и  $K_{i-1,i}$ ) относятся к конструкционному демпфированию в деталях соединения валов, а также внутреннему трению в материале валов.

Таким образом, система уравнений, получаемая из (6), отражает комбинированное воздействие на много-роторный валопровод агрегата, упруго-механических и электромагнитных явлений, совместно порождающих сложный гамма-колебательный процесс. Электромагнитные воздействия, как при наличии автоматического регулирования, так и без него, сводятся к появлению квазиупругих (синхронизирующих) и демпферных (асинхронных) моментов [9], обозначаемых у генератора через  $M_s$  и  $M_a$ , а у возбудителя — через  $m_s$  и  $m_a$ .

**Критерии подобия.** Как показано ниже, наиболее подходящей формой подобия систем с многими степенями свободы является не подобие сложных числовых комбинаций, а подобие матриц, из которых каждая представляет характеристику определенной стороны колебательного процесса. Элементы такой матрицы являются простейшими безразмерными физическими критериями типа относительной частоты  $\omega_i$ , относительного коэффициента демпфирования  $\alpha_i$  или локального критерия Ньютона  $\Pi_{Ne}$ , относящихся к отдельным звеньям системы.

Произведем с матрицами  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{C}$  операции перемножения:

$$\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B} = \Pi_\alpha = \begin{vmatrix} \alpha_{21} - \alpha_{12} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -\alpha_{12} & \alpha_2 & -\alpha_{23} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & -\alpha_{i-1,i} & \alpha_i - \alpha_{i,i+1} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & -\alpha_{n-1,n} & \alpha_n \end{vmatrix}; \quad (10)$$

$$\mathbf{A}^{-1}\mathbf{C} = \Pi_\omega = \begin{vmatrix} \omega_1^2 - \omega_{12}^2 & 0 & \dots & 0 \\ -\omega_{12}^2 & \omega_2^2 & -\omega_{23}^2 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & -\omega_{i-1,i}^2 & \omega_i^2 - \omega_{i,i+1}^2 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & -\omega_{n-1,n}^2 & \omega_n^2 \end{vmatrix}; \quad (11)$$

$$\mathbf{A}^{-1}\mathbf{M}(t) = \begin{vmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \vdots \\ \mu_i \\ \vdots \\ \mu_n \end{vmatrix} = \Pi_{Ne}. \quad (12)$$

Матрицы  $\Pi_\alpha$ ,  $\Pi_\omega$ ,  $\Pi_{Ne}$ , которые названы соответственно диссипативной, консервативной и ньютоновой, содержат элементы  $\omega_i = \frac{K_i \tau^2}{J_i}$ ;  $\alpha_i = \frac{D_i \tau}{2 J_i}$ ;  $\mu_i = \frac{M_i(t) \tau^2}{J_i}$

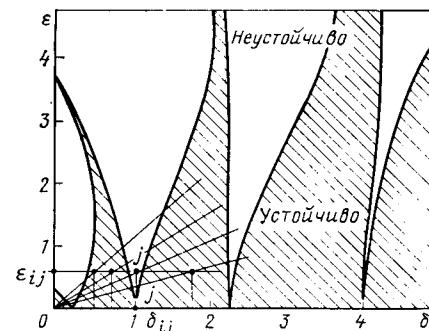


Рис. 2

и могут быть представлены как в безразмерной форме, так и с размерностью  $1/c$ , что более предпочтительно, если моделирование ведется в натуральном масштабе времени. Матрицы  $\Pi_\alpha$ ,  $\Pi_\omega$  и  $\Pi_{Ne}$  выражают не только условия подобия, но и могут служить аппаратом синтеза параметров колебательной системы, обеспечивающих требуемый характер процесса.

Рассмотрим в качестве примера нахождение критерия подобия для случая параметрического резонанса валопровода турбоагрегата. Здесь резонанс обусловлен периодически изменяющейся электромагнитной упругостью при асинхронном ходе генератора [2].

Суть явления заключается в том, что если в режиме асинхронного хода с постоянным скольжением  $s$  на угол  $\delta = \omega_s t$  накладываются малые колебания  $\Delta\delta = \theta$ , то врашающий момент

$$M_r \approx \frac{UE}{x_d} \sin(\omega_s t + \theta)$$

или учитывая малость  $\theta$  и применяя обычную линеаризацию ( $\cos \theta \approx 1$ ,  $\sin \theta \approx 0$ ),

$$M_r = \frac{UE}{x_d} (\sin \omega_s t + \theta \cos \omega_s t). \quad (13)$$

В простейшей системе, где ротор генератора с моментом инерции  $J_r$  связан валом с турбиной, имеющей относительно большой момент инерции ( $J_t \gg J_r$ ) получим, применяя уравнение Даламбера:

$$J_r \frac{d^2\theta}{dt^2} + K\theta = \frac{UE}{x_d} (\sin \omega_s t + \theta \cos \omega_s t).$$

Вводя безразмерное время  $\tau = \omega_s t$  ( $dt = d\tau/\omega_s$ ) и сокращенные обозначения, представляющие собой также безразмерные величины

$$\delta = \frac{K}{J_r \omega_s^2}; \quad \varepsilon = \frac{UE}{J_r \omega_s^2 x_d},$$

получим

$$\frac{d^2\theta}{d\tau^2} + (\delta + \varepsilon \cos \tau) \theta = \varepsilon \sin \tau. \quad (14)$$

Однородная часть (14) представляет собой уравнение Матте, имеющее области устойчивых и неустойчивых решений, определяемых из диаграмм Айнса — Стретта изображенные на рис. 2 для многороторного валопровода турбоагрегата.

Решение задачи устойчивости гамма-колебательного процесса многороторного валопровода турбогенератора при асинхронном ходе или при подсинхронном резонан-

се дано в [2], где показано, что для систем с  $n$  степенями свободы, описываемых обобщенным уравнением Маттье, области устойчивости на диаграмме определяются не одним, а  $n$  лучами, каждый из которых соответствует своей нормальной координате.

Возможность параметрической неустойчивости для каждой степени свободы и для каждой возбуждающей частоты будет определяться  $n$  парами значений  $\delta_{ij}$  и  $\epsilon_{ij}$ , которые образуют прямоугольную матрицу с числом строк  $m$  и числом столбцов  $n$ , где  $m$  — число возможных частот скольжения  $\omega_s$ .

В таком случае критериальная матрица будет иметь вид:

$$\Pi_p = \begin{vmatrix} \delta_{11}(\varepsilon) & \delta_{12}(\varepsilon) & \dots & \delta_{1n}(\varepsilon) \\ \delta_{21}(\varepsilon) & \dots & \dots & \dots \\ \delta_{m1}(\varepsilon) & \dots & \dots & \delta_{mn}(\varepsilon) \end{vmatrix}.$$

Таким образом, матрица подобия  $\Pi_p$  является одновременно и показателем областей неустойчивых решений. В этом смысле предлагаемые критерии подобия служат показателями качественных изменений процессов, аналогично тому, как это имеет место в гидродинамике, где, например, критерий Рейнольдса характеризует переход из ламинарного течения в турбулентное и т. п.

**Демпфирование колебаний** представляет собой одну из актуальных проблем виброустойчивости. Оно является одной из мер борьбы с шумом и, что наиболее существенно для мощных агрегатов, мерой предупреждения усталостного разрушения их узлов и деталей валопровода [6].

Основным фактором при изучении демпфирования является характерное свойство механических колебательных систем, выражаемое условием:

$$\frac{\Pi_\alpha}{\Pi_\omega} \ll 1, \quad (15)$$

связывающим нормы оценки и означающее, что при любой технически возможной вариации элементов диссипативной матрицы  $\Pi_\alpha$  консервативная матрица остается неизменной.

Это обстоятельство позволяет вести выбор и оптимизацию параметров демпфирования, не нарушая условий консервативного подобия. Практически это означает возможность применения разного рода демпферов, в том числе электромагнитного со стороны электрической части агрегата, что, как показывают расчеты, оказывается более эффективным, чем конструкционное и другие виды демпфирования.

Условие (15) приводит к возможности аппроксимации фундаментальных соотношений Релея [7], которые при использовании установленных выше критериев получают вид:

$$\omega_0 \approx \frac{\theta^T \Pi_\omega A \theta}{\theta^T A \theta}; \quad (16)$$

$$\alpha_0 = \frac{\theta^T \Pi_\alpha A \theta}{\theta^T A \theta}, \quad (17)$$

где  $\omega_0$  и  $\alpha_0$  — собственная частота и коэффициент демпфирования системы для данной формы колебания.

Уравнения (16) и (17) при подстановке в них критериев (10) и (11) принимают вид, удобный для практи-

ческих расчетов:

$$\omega_0 \approx \frac{\sum_{i=1}^n [K_{i,i+1} (\theta_i - \theta_{i+1})^2 + K_i \theta_i^2]}{\sum_{i=1}^n J_i \theta_i^2}; \quad (18)$$

$$\alpha_0 = \frac{\sum_{i=1}^n [D_{Hi,i+1} (\theta_i - \theta_{i+1})^2 + D_{Ri} \theta_i^2]}{\sum_{i=1}^n J_i \theta_i^2} \quad (19)$$

В формулах (18) и (19) четко разделены факторы внутреннего демпфирования и внутренней упругости (первые члены в числителях) и внешнего демпфирования и упругости (вторые члены в числителях).

Имеющиеся экспериментальные данные по внутреннему и конструкционному демпфированию недостаточны для проведения подробных расчетов, из чего вытекает необходимость дальнейших исследований на моделях и в натурных условиях [4 и 6].

В таблице приведены результаты расчетов, проведенных для мощного турбоагрегата с использованием приближенных данных [8], с учетом электромагнитной упругости и электромагнитного демпфирования [9], характерных для гамма-колебательного процесса.

Число узлов	Собственная частота $\omega_0$	Коэффициент демпфирования $\alpha_0$	Логарифмический декремент $v$	$\frac{\theta_k}{\theta_{k+1}}$	Относительные амплитуды гамма-колебаний роторов*			
					№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
0	26,5	0,57	0,135	1,15	32,0	1	1,6	2,0
1	30,3	0,23	0,048	1,05	3,5	1	2,2	2,9
2	79,2	1,41	0,112	1,12	0,12	1	0,8	1,16
3	111,6	1,19	0,067	1,07	0,06	1	0,7	3,0
Сист.**	41,2	1,30	0,20	1,22	1	1	1	1

П р и м е ч а н и я . \* Все амплитуды выражены в долях амплитуды колебаний ротора генератора; \*\* Системные колебания соответствуют обычно рассчитываемым при исследовании динамической устойчивости без учета крутильной упругости валопровода.

Валопровод (рис. 1) представлен четырехмассовой системой (№ 1 — возбудитель, № 2 — генератор, № 3 — турбина высокого давления, № 4 — турбина низкого давления), дающей четыре формы и четыре частоты собственных колебаний ввиду наличия в гамма-колебательном процессе дополнительно нуль-узлового колебания вследствие электромагнитной связи [3].

Как видно из таблицы, опасным является резонанс по нуль-узловому колебанию, при котором ротор возбудителя оказывается динамическим гасителем колебаний. Возникающие при этом механические напряжения приводят к повреждениям валов возбудителей.

**Выводы.** 1. Для моделирования гамма-колебательных процессов, образуемых явлениями различной физической природы, наиболее эффективным оказывается применение матричных критериев подобия.

2. Критерии в виде матриц консервативного и диссипативного подобия, будучи основой моделирования, являются также критериями оценки качественных изменений процессов (например, возникновение параметрической неустойчивости).

3. Из анализа матрицы диссипативного подобия вытекает возможность четкого аналитического выделения

факторов внешнего и внутреннего демпфирования. Это позволяет вести анализ и синтез демпферной системы агрегата, включая сюда внутреннее (в материале валопровода), конструкционное и внешнее (электромагнитное и в паровом объеме турбины) демпфирование.

4. Учитывая особую важность гашения колебаний, снижающего вероятность усталостного повреждения валопровода, необходимы исследования этого вопроса на физических моделях и в натурных условиях.

#### Список литературы

1. Глебов И. А., Камша М. М., Урусов И. Д. Параметрический резонанс при крутильных колебаниях валопровода агрегата, содержащего синхронную машину.—Доклады АН СССР, 1979, т. 248, № 1.

2. Урусов И. Д. Устойчивость периодических решений при

параметрическом возбуждении колебаний в многомассовом роторе.—Доклады АН СССР, 1980, т. 254, № 2.

3. Урусов И. Д. Новый вид свободных тангенциальных колебаний в валопроводах турбогенераторов.—Доклады АН СССР, 1982, т. 262, № 4.

4. Электрические машины. Обзор по материалам СИГРЭ-78/Под ред. И. А. Глебова и Л. Г. Мамиконяна.—М.: Энергоиздат, 1981.

5. Веников В. А. Теория подобия и моделирования.—М.: Высшая школа, 1976.

6. Урусов И. Д., Камша М. М. Проблема прочности при крутильных колебаниях в валопроводах турбогенераторов.—Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1980, № 1.

7. Вибрации в технике.—М.: Машиностроение, 1978, т. 1.

8. Hamptons T. J. Effect of three-phase system faults and synchronisation on the mechanical stressing of large turbine-generators.—GGE, 1977, vol. 86, № 7/8.

9. Урусов И. Д. Линейная теория колебаний синхронной машины.—М.: Изд. АН СССР, 1960.

[22.09.82]



УДК 621.313.322-82.018.782.3:621.316.925

## Исследование асинхронных режимов мощных гидрогенераторов

КОСТЕЛЯНЕЦ В. С., канд. техн. наук

Ленинград

Работа гидрогенератора в асинхронных режимах Правилами технической эксплуатации не допускается. Для его защиты в этих режимах должны производиться либо отключение от энергосистемы, либо экстренная разгрузка турбины с последующей ресинхронизацией. Разработаны различные варианты защиты от асинхронного режима, основанной на измерении полного сопротивления синхронной машины [1 и 2], а в [3] сформулированы условия допустимости ресинхронизации, учитывающие термическую стойкость и механическую прочность машины, и описано устройство защиты, основанной на фиксации времени изменения внутреннего угла генератора от  $\pi$  до  $3\pi/2$  и позволяющей в определенных случаях осуществлять отключение или ресинхронизацию. Существуют предложения по защите синхронной машины от асинхронного режима при потере возбуждения [4 и 5]. Эти и другие исследования и разработки оказались не достаточными при попытке дать некоторые общие рекомендации для выполнения таких защит.

Цель настоящей статьи — обоснование необходимого момента времени отключения мощного высокоиспользованного гидрогенератора при наличии и потере возбуждения защитой от асинхронного режима и сравнение эффективности действия защит, выполненных с использованием различных способов выявления этого режима.

Расчеты асинхронных режимов гидрогенераторов выполнялись на ЦВМ<sup>1</sup> для схемы энергосистемы, содержащей силовой трансформатор с сопротивлением  $x_t = 0,12$ , линию электропередачи с индуктивным сопротивлением  $x_L$  и шины неизменного напряжения и постоянной частоты. Переходные процессы в генераторе описывались уравнениями Парка — Горева.

В соответствии с [6] демпферная система генератора моделировалась одним уравнением в каждой оси. Учитывались регулирование момента турбины, односторонняя проводимость вентильного возбудителя и подключение

защитного сопротивления десятикратной величины по отношению к сопротивлению обмотки возбуждения при изменении полярности тока возбуждения. При увеличении тока возбуждения более двойного номинального значения напряжение возбуждения принималось равным двойному номинальному. Если ток возбуждения уменьшался до значений, меньших двойного номинального, напряжение возбудителя задавалось автоматическим регулятором возбуждения.

Допустимая продолжительность асинхронного режима по условию термической стойкости обмоток генератора в предположении адиабатического характера процесса их нагрева принималась равной времени достижения энергией, рассеиваемой в каждой обмотке в виде потерь, допустимого значения.

Энергия, рассеиваемая к моменту времени  $t$  в  $i$ -й обмотке с активным сопротивлением  $r_i$  и изменяющимся в асинхронном режиме током  $i_i$ , вычислялась как

$$\int_0^t i_i^2 r_i dt.$$

Допустимое значение энергии  $\mathcal{E}_i$  для каждой из обмоток определялось на основании нормируемых ГОСТ или техническими условиями кратковременных перегрузок генератора по току. Для обмоток статора и возбуждения значения  $\mathcal{E}_{ct}$  и  $\mathcal{E}_b$ , вычислялись по выражению:

$$\mathcal{E}_i = (2I_{hi})^2 r_i t_i,$$

где  $t_i$  — время, в течение которого допустим двойной номинальный ток статора или возбуждения соответственно.

Для демпферных обмоток допустимое значение  $\mathcal{E}_d$  рассчитывалось при заданной величине  $I_d^2 t$  из условия протекания в схеме замещения синхронной машины единичного тока  $I_2$  обратной последовательности:

$$\mathcal{E}_d = \frac{I_d^2 t}{2} k_f \left[ \left( \frac{x_d'' - x_\sigma}{x_{\sigma d}} \right)^2 r_d + \left( \frac{x_q'' - x_\sigma}{x_{\sigma q}} \right)^2 r_q \right],$$

<sup>1</sup> В составлении программы и выполнении расчетов на ЦВМ принимали участие Е. М. Качурина и С. Л. Костелянец.

где  $k_f$  — коэффициент добавочных потерь для демпферной обмотки при частоте 100 Гц [7].

Оценим, в каких случаях экстренная разгрузка турбины с последующей ресинхронизацией гидрогенератора может оказаться достаточным средством для обеспечения защиты его обмоток от термических перегрузок.

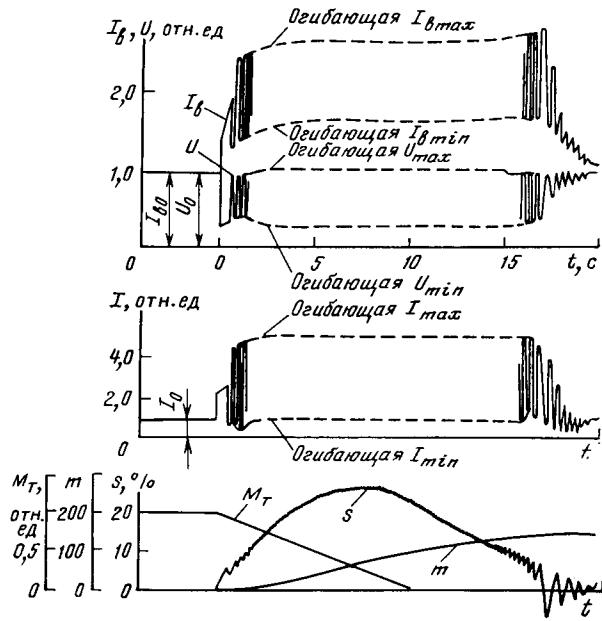


Рис. 1. Диаграмма асинхронного режима возбужденного гидрогенератора:

$U, I$  — напряжение и ток статора генератора;  $U_0, I_0$  — их начальные значения;  $I_b$  — ток обмотки возбуждения;  $I_{b0}$  — его начальное значение;  $s$  — скольжение ротора;  $M_T$  — момент турбины;  $m$  — количество проворотов ротора;  $P_H = 640$  МВт;  $x_d = 1,58$ ;  $x_q = 0,97$ ;  $x_\sigma = 0,183$ ;  $x_{\sigma f} = 0,29$ ;  $r_f = 0,66 \cdot 10^{-8}$ ;  $x_{od} = 0,208$ ;  $r_d = 0,7 \cdot 10^{-2}$ ;  $x_{dq} = 0,156$ ;  $r_q = 0,57 \cdot 10^{-2}$ ;  $\tau_f = 9,4$  с; время сервомотора 10 с; регулирующий эффект турбины по частоте — 0,8

На рис. 1 приведена диаграмма асинхронного режима генератора в концентрированной энергосистеме ( $x_{ll}=0$ ) при нарушении динамической устойчивости в результате трехфазного короткого замыкания длительностью 0,6 с на одной из отходящих линий электропередачи вблизи шин высшего напряжения станции.

При достижении внутренним углом генератора на первом провороте ротора значения  $\lambda$  был дан сигнал на закрытие направляющего аппарата турбины. При уменьшении момента турбины в процессе разгрузки до значения, соответствующего максимуму среднего асинхронного момента, составляющего около 0,6 отн. ед., ресинхронизация не произошла, так как величина скольжения ротора при этом достигла 20 %, значительно превысив критическое значение. Ресинхронизация произошла лишь после полного закрытия направляющего аппарата турбины и последующего уменьшения скольжения до нуля. Продолжительность асинхронного режима до ресинхронизации составила 17,5 с. При этом ротор совершил около 150 проворотов относительно шин постоянной частоты.

Допустимая длительность этого режима, рассчитанная по условию термической стойкости обмоток генератора, составила для статора 5 с, для демпферных контуров 14 с и для обмотки возбуждения 16 с. Эти результаты получены для гидрогенератора типа СВФ 1285-275-42 с водяным охлаждением обмотки статора при условии, что время, в течение которого допустим двойной номинальный ток, составляло 20 с для обмотки статора и возбуждения, и  $I^2 t = 20$  с.

За время 5 с ротор совершил около 35 проворотов, скольжение достигло 23 %. Большую часть этого времени ток статора имел пульсирующий характер и многократно достигал 0,85 ударного тока трехфазного короткого замыкания на зажимах генератора. Напряжение статора при этом уменьшалось до 0,3 номинального. Электромагнитный момент колебался частотой скольжения в диапазоне от -3,1 до +3,2 момента в номинальном режиме генератора и составлял 0,95 максимального значения изменяющегося с частотой 50 Гц электромагнитного момента генератора при трехфазном коротком замыкании на зажимах обмотки статора. Таким образом, электродинамические воздействия на обмотки генератора соизмеримы с предельными расчетными значениями, и генератор следует максимально быстро отключить, тем более, что ресинхронизация его за эти 5 с невозможна.

За время, допустимое по условиям термической стойкости обмоток, не происходит также ресинхронизация этого генератора, разогруженного после потери им возбуждения, если активная мощность в исходном режиме превышает максимум характеристики среднего асинхронного момента. Диаграмма такого асинхронного режима приведена на рис. 2. В момент  $t=0$  напряжение возбуждения было принято равным нулю, а при достижении внутренним углом генератора значения  $\lambda$  был дан сигнал на закрытие направляющего аппарата турбины. Для увеличения асинхронного момента генератора обмотка возбуждения замыкалась на защитное сопротивление при первом переходе тока возбуждения через нулевое значение, в результате чего относительный максимум характеристики среднего асинхронного момента возрос до 0,8. Благодаря этому максимальное значение скольжения, число проворотов ротора и продолжительность режима до момента ресинхронизации оказались несколько меньшими, чем в предыдущем случае. Допустимая

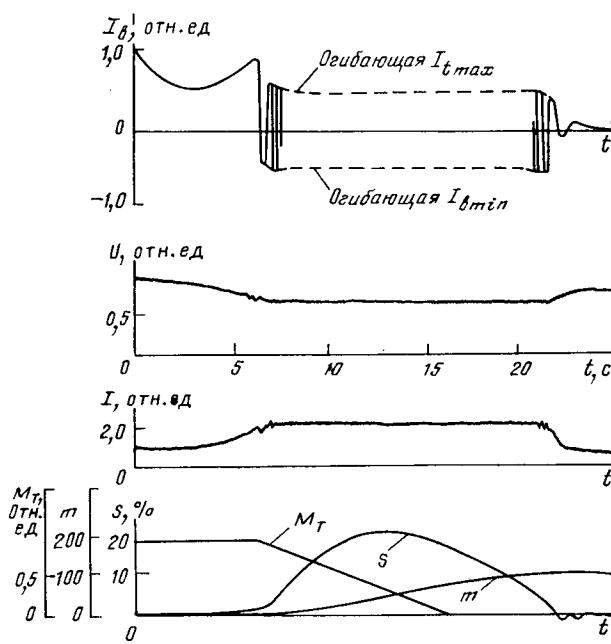


Рис. 2. Диаграмма асинхронного режима генератора при потере возбуждения для  $M_T=1$

длительность такого асинхронного режима с момента достижения внутренним углом генератора значения  $\pi$  составила для обмоток статора и демпферных контуров 14 и 15 с соответственно. Ток возбуждения не превышал номинального значения.

Наличие даже достаточно большого индуктивного сопротивления линии электропередачи несущественно меняет условия протекания переходного процесса при асинхронном режиме возбужденного генератора. При  $x_n = 0,4$ , т. е. когда электрический центр в асинхронном режиме, аналогичном проиллюстрированному диаграммами рис. 1, переместился из генератора в начало линии электропередачи, продолжительность режима до момента ресинхронизации увеличилась до 22 с вследствие меньшего значения асинхронного момента. Максимальные значения тока статора уменьшились с  $5,6 I_n$  до  $4,1 I_n$ , а допустимая длительность режима по условиям термической стойкости обмоток составила для статора 9 с и для обмотки возбуждения 18 с. Энергия, выделившаяся в демпферных контурах к моменту ресинхронизации гидрогенератора, достигла 50 % допустимого значения. Напряжение вблизи шин высшего напряжения станции многократно уменьшалось до нуля.

Таким образом, ни в одном из приведенных выше примеров экстренная разгрузка турбины не оказалась достаточным средством для обеспечения защиты обмоток генератора от термических перегрузок. Учитывая, что в этих режимах многократные электродинамические воздействия на обмотки соизмеримы с предельными расчетными в течение времени, существенно превышающего время отключения расчетных коротких замыканий, и происходит значительное уменьшение напряжения в энергосистеме, генератор необходимо отключать на первом провороте ротора.

Рекомендовать разгрузку этого гидрогенератора без его отключения на первом повороте ротора можно лишь в исключительном случае, с целью предотвращения отключения укрупненного блока, при потере возбуждения одним из генераторов, работающим с генераторным выключателем, не обеспечивающим отключение токов, больших номинального, и с исходной мощностью, меньшей максимума характеристики среднего асинхронного момента. Диаграмма такого режима приведена на рис. 3. Здесь ротор до ресинхронизации совершил два проворота, ток статора не превысил двухкратного номинального, энергия, выделившаяся в демпферных контурах, составила 2 % допустимого значения.

После ресинхронизации ток статора меньше номинального, и генератор может быть отключен или, если такой режим, характеризующийся потреблением значительной реактивной мощности, допустим по условиям нагрева крайних пакетов стали статора, после ликвидации исправности системы возбуждения возможно восстановление исходного режима гидрогенератора, входящего в укрупненный блок.

В блоке генератор — трансформатор или при наличии в укрупненном блоке генераторного выключателя, обеспечивающего отключение токов статора в асинхронном режиме при потере возбуждения, гидрогенератор целесообразно отключать от энергосистемы на первом провороте ротора.

Аналогичные расчеты асинхронных режимов были выполнены для гидрогенераторов типа СВ 712/227-24 мощностью 260 МВт и типа СВ 1190/250-48 мощностью 250 МВт с водяным и форсированным воздушным охлаждением обмоток статора соответственно. Все пара-

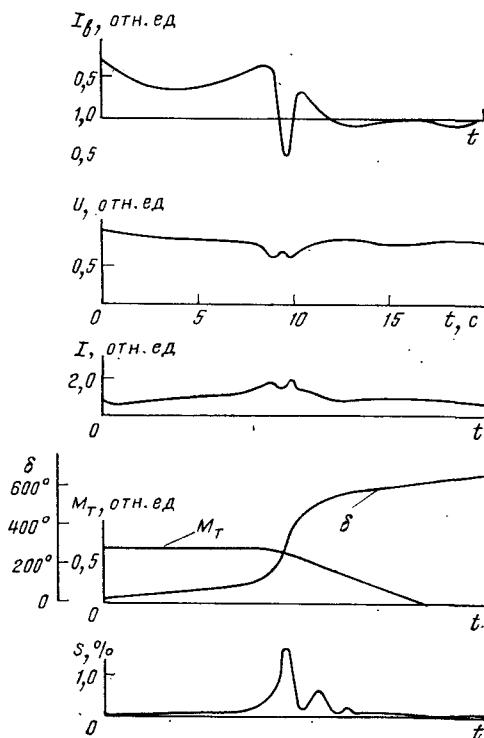


Рис. 3. Диаграмма асинхронного режима генератора при потере возбуждения для  $M_T = 0,73$ :  $\delta$  — внутренний угол ротора генератора

метры первого из них, кроме времени сервомотора, несущественно отличались от параметров агрегата СВФ. Уменьшение времени сервомотора до 8 с привело к тому, что режим потери возбуждения, аналогичный проиллюстрированному на рис. 2, оказался допустимым по условиям термической стойкости обмоток генератора. Скольжение в этом режиме достигло 13 %, ресинхронизация произошла через 8,5 с после момента времени, когда внутренний угол генератора был равен  $\pi$ . Энергия, выделившаяся в обмотках статора и демпферных контурах, составила около 60 %, а в обмотке возбуждения — около 5 % допустимого значения.

Расчеты асинхронных режимов гидрогенератора с форсированным воздушным охлаждением показали, что, кроме уменьшения времени сервомотора (8 с) самым существенным отличием в параметрах оказалось увеличение до 60 с времени, в течение которого допустим двойной номинальный ток статора. В результате такого отличия даже самый тяжелый асинхронный режим возбужденного генератора, аналогичный проиллюстрированному на рис. 1, оказался допустимым, хотя и близким к предельному по условиям термической стойкости обмотки статора синхронной машины.

Энергия, выделившаяся в обмотках возбуждения и демпферных контуров, составила 25 и 50 % допустимого значения. Скольжение не превысило 15 %, ресинхронизация произошла через 10 с после момента времени, когда внутренний угол генератора был равен  $\pi$ . Поскольку ток статора в течение этих 10 с соизмерим с предельными расчетными значениями токов короткого замыкания, можно по-прежнему считать целесообразным отключение возбужденного генератора на первом провороте ротора. При оценке целесообразности отключения агрегата на каждой конкретной электростанции следует

учитывать, что при его отключении происходит, как правило, более длительная, чем без отключения, потеря генерирующей мощности в энергосистеме. При потере возбуждения таким генератором наибольшая энергия в долях допустимого значения выделилась в демпферной обмотке и составила 25 %. Поэтому можно осуществлять разгрузку такого агрегата без его отключения от сети в случаях, когда это приводит к безусловному повышению надежности энергосистемы.

Расчеты показали, что переходные процессы в асинхронном режиме возбужденного гидрогенератора практически не отличаются при изменении предельного напряжения возбуждения в диапазоне от двух до четырех номинальных значений. Ток возбуждения, достигнув в начале процесса двойного номинального значения, колеблется далее около него, в основном за счет составляющей тока возбуждения, обусловленной взаимодействием обмоток статора и возбуждения.

Наиболее распространенный способ выявления асинхронного режима основан на измерении полного сопротивления на выводах генератора. Поскольку в этом способе отсутствует непосредственная фиксация факта нарушения устойчивости генератора, например факта превышения внутренним углом генератора значения, свидетельствующего о возникновении асинхронного режима, для повышения надежности действия и быстродействия защиты и отстройки ее от режима синхронных качаний предложены многочисленные ее усовершенствования [1 и 2], в определенной мере улучшающие характеристики защиты, но усложняющие ее алгоритм и конструкцию.

Принципиально более совершенной является защита [3 и 6], выявляющая асинхронный режим при наличии и потере возбуждения на первом провороте ротора по внутреннему углу генератора и контролирующая значение среднего скольжения при изменении этого угла от  $\pi$  до  $3\pi/2$  и ток статора. При достижении углом  $\delta$  значения  $\pi$  фиксируется наличие асинхронного режима, подается команда на разгрузку турбины, и в элементе памяти реле начинается отсчет времени изменения угла  $\delta$  от  $\pi$  до  $3\pi/2$ . Это время, обратно пропорциональное среднему значению скольжения ротора в указанном диапазоне изменения  $\delta$ , сравнивается в элементе памяти с заданной уставкой. Если оно меньше уставки, а ток статора больше заданного значения, защита дает сигнал на отключение генератора.

Одновременно с командой на разгрузку турбины следует подавать сигнал на подключение защитного сопротивления параллельно обмотке возбуждения для предотвращения перенапряжений при переходе тока возбуждения через нуль.

Такая защита имеет постоянную зону действия. При включении ее, например, на шинах высшего напряжения блока генератор — трансформатор она выявляет все асинхронные режимы с электрическим центром внутри блока. Поэтому защита просто согласуется с системной автоматикой, выявляющей асинхронный режим с электрическим центром в системе. В частности, таким является описанный выше режим возбужденного генератора при  $x_{\pi}=0,4$ , и быстродействующее прекращение этого режима должно осуществляться системной противоаварийной автоматикой. Зона действия защиты, основанной на измерении сопротивления, зависит от выбора ее характеристик, и при ее согласовании с системной автоматикой могут возникнуть затруднения.

В [6] показано, что при определенном задании уставки элемента памяти защита [3] может разграничить

асинхронные режимы при наличии и потере возбуждения. Эта уставка может быть определена экспериментально, в опыте сброса полной нагрузки агрегата, измерением времени изменения угла  $\delta$  от  $\pi$  до  $3\pi/2$ . В режимах при потере возбуждения это время оказывается больше уставки, поскольку ротор тормозится асинхронным моментом. В режимах с возбуждением время на этом участке изменения угла оказывается меньшим уставки вследствие ускоряющего действия синхронного момента после нарушения устойчивости ротора генератора. Уставка может быть также определена из уравнения движения ротора [6]:

$$t_y = \sqrt{\frac{\pi \tau_j}{\omega_s M_T}},$$

где  $M_T=1$  — момент турбины в номинальном режиме;  $\omega_s=314$  1/c.

Таким образом, защита может отключить генератор на первом провороте ротора после  $\delta=3\pi/2$ , и при этом сравнением времени изменения угла  $\delta$  от  $\pi$  до  $3\pi/2$  с выбранным способом уставкой дополнительно обеспечит сигнализацию о наличии или потере возбуждения.

При потере возбуждения гидрогенератором, работающим в укрупненном блоке, когда рекомендуется разгрузка генератора без его отключения на первом провороте ротора, как это показано диаграммами рис. 3, защита должна быть настроена на разграничение установившихся и неустановившихся асинхронных режимов невозбужденной машины. Уставка элемента памяти и в этом случае может быть определена экспериментально и по приведенной формуле при моменте турбины, равном в относительных единицах максимуму среднего асинхронного момента генератора.

Одно из преимуществ защиты, по сравнению, например, с защитой, основанной на измерении сопротивления генератора, состоит в принципиальной возможности отключения выключателя при благоприятных углах по условиям восстановления напряжения на его контактах, что может оказаться особенно полезным применительно к генераторному выключателю. Если, наоборот, скорость восстановления напряжения на контактах выключателя и токи отключения находятся на допустимом уровне, имеется принципиальная возможность ускорять действие и отключать генератор при достижении внутренним углом генератора значения  $\pi$ . Использование ее особенно целесообразно в случае, когда уменьшение напряжения в энергосистеме, вызванное возникновением асинхронного режима генератора, может привести к дальнейшему развитию аварии в энергосистеме.

При отсутствии описанных выше защит или с целью повышения надежности разграничения ими асинхронных режимов при наличии и потере возбуждения могут быть установлены защиты от потери возбуждения, контролирующие либо превышение током статора 1,3—1,5 номинального значения [4], либо уменьшение напряжения статора ниже 0,8—0,95 номинального [5] и срабатывающие при переходе тока возбуждения через значение, близкое к нулевому. Эти защиты при отсутствии в них, кроме тока возбуждения, второго контролируемого параметра неработоспособны. С одной стороны, они должны иметь выдержку времени для отстройки от периодической составляющей тока возбуждения при коротких замыканиях и от его близких к нулевому значений, возникающих в результате быстродействующего регулирования возбуждения в переходных режимах генератора. С другой

стороны, эта выдержка времени не должна превышать продолжительность первого отрицательного полуperiода изменения тока возбуждения в асинхронном режиме при потере возбуждения, как это видно, например, из диаграмм рис. 2, где эта продолжительность равна 0,27 с.

Расчеты на ЦВМ показали, что первый переход тока возбуждения через нуль происходит при внутреннем угле, близком к  $3\pi/2$ , и при выдержке времени, меньшей 0,1 с, защита выявляет этот режим при угле, не превышающем  $2\pi$ , т. е. на первом провороте ротора. При наличии в защите второго, кроме тока возбуждения, контролируемого параметра выдержка времени может быть принята равной нулю. Первая из этих защит [4] может быть рекомендована для установки на многоагрегатных станциях и на станциях, присоединенных к мощным энергосистемам через относительно короткие линии ( $x_L < 0,2$ ). На станции с одним агрегатом, присоединенным к энергосистеме через длинные линии, лучше использовать защиту, контролирующую уменьшение напряжения статора.

В качестве резервной защиты генератора в асинхронных режимах, действующей на отключение независимо от положения электрического центра, может рассматриваться защита от перегрузки по току статора, имеющая интегральный орган и зависимую от времени характеристику срабатывания.

Максимальная токовая защита с блокировкой по напряжению статора не действует в таких режимах вследствие многократного увеличения этого напряжения выше уставки.

**Выводы.** 1. Гидрогенераторы с водяным охлаждением обмоток статора необходимо оснащать защитой от асинхронного режима, обеспечивающей возможность выявлять его и осуществлять отключение на первом провороте ротора. Такую защиту целесообразно применять и для мощных высокопроизводительных гидрогенераторов с форсированным воздушным охлаждением, учитывая вместе с тем, что при потере ими возбуждения допустима их разгрузка без отключения от сети в случаях, когда это приводит к безусловному повышению надежности энергосистемы.

2. В качестве типовой можно рекомендовать защиту, основанную на фиксации времени изменения внутреннего угла синхронной машины от  $\pi$  до  $3\pi/2$ . Эта защита, по сравнению с применяемой многими иностранными фирмами и основанной на изменении полного сопротивления генератора, выявляет асинхронный режим при наличии и потере возбуждения на первом провороте ротора, может разграничить режимы при наличии и потере возбуждения, а также установившиеся и неустановившиеся асинхронные режимы при потере возбуждения, обеспечивает отключение выключателя при благоприятных углах по условиям восстановления напряжения на его контактах.

3. Защиты от потери возбуждения, контролирующие либо превышение током статора 1,3—1,5 номинального значения, либо уменьшение напряжения статора ниже 0,8—0,95 номинального и срабатывающие при переходе тока возбуждения через значение, близкое к нулевому, выявляют асинхронный режим на первом провороте ротора.

#### Список литературы

1. Gantner J., Gaillet B., Pienne M. G. Protection contre le fonctionnement hors synchronisme des grosses machines synchrones.— Electra (France), 1977, № 50.
2. Павлов Г. М., Ванин В. К. Защита генератора от асинхронного хода.— Электрические станции, 1981, № 12.
3. Больнов В. В. Опыт эксплуатации защиты от асинхронного хода генераторов Красноярской ГЭС.— Электрические станции, 1975, № 5.
4. А. с. 700892 (СССР). Способ защиты синхронной машины от асинхронного режима при потере возбуждения/Г. Я. Беньковская, В. С. Костелянец, А. Д. Стоцкий, О. И. Яковлев. Опубл. в Б. И., 1979, № 44.
5. А. с. 553708 (СССР). Устройство для защиты синхронного генератора от потери возбуждения/Г. И. Воронин, Ф. Л. Коган, В. Г. Сутягин, М. М. Фридман. Опубл. в Б. И., 1977, № 13.
6. Костелянец В. С., Кацурина Е. М. О допустимости упрощенного расчета уставок защиты гидрогенераторов от асинхронных режимов.— Электричество, 1981, № 1.
7. Проектирование гидрогенераторов/В. В. Домбровский, А. С. Еремеев, Н. П. Иванов и др.— М.: Энергия, 1965.

[26.07.82]

~~~~~

УДК 621.313.013.001.24

## Расчет вихревого и потенциального магнитных полей в явнополюсных электрических машинах

ИНКИН А. И.

Новосибирск

В [1, 2] на базе кусочно-непрерывных собственных функций были аналитически исследованы потенциальные магнитные поля в кусочно-неоднородных структурах электрических машин с ферромагнитными полюсами при конечных значениях их магнитных проницаемостей и в машинах с постоянными магнитами, для которых отношение остаточной индукции ( $B_0$ ) и коэрцитивной силы ( $H_0$ ) в общем случае не равно магнитной проницаемости вакуума.

В электрических машинах постоянного тока, синх-

ронных машинах и других электротехнических устройствах между полюсами пространства заполнены токонесущими обмотками, вследствие чего магнитные поля в этих областях не являются потенциальными.

При исследовании электромагнитных процессов в этих машинах, в особенности при высоком использовании магнитопровода, существенно важное значение приобретает аналитическое решение задачи о совместном расчете вихревого поля в междуполюсном пространстве и потенциальных полей в объемах полюсов с конеч-

ной магнитной проницаемостью и воздушном зазоре.

Настоящая статья посвящена решению одной из конкретных задач этого класса: рассчитать распределение магнитного поля в междуполюсных пространствах, занятых токами, ферромагнитных полюсах и немагнитном воздушном зазоре явнополюсной электрической машины.

На рис. 1 изображена двухзонная расчетная модель, в которой зона I представляет собой совокупность чередующихся пазов, занятых обмоткой возбуждения, с полным током паза  $I$  и ферромагнитных полюсов, а вторая зона II есть плоский воздушный зазор с границами  $y=h$  и  $y=h+\Delta$ .

Задача решается при следующих допущениях:

магнитная проницаемость ярем бесконечно велика;

ферромагнитный полюс представляется в виде линейной среды с некоторым произвольным значением магнитной проницаемости  $\mu_f$ ;

для упрощения математических преобразований распределение тока в междуполюсном пространстве предполагается равномерным.

При исследовании поля воспользуемся векторным потенциалом  $\vec{A}$ . В междуполюсном пространстве (индекс  $n$ ) векторный потенциал  $\vec{A}^n = \vec{k}_z A_z^n$  удовлетворяет уравнению Пуассона:

$$\frac{\partial^2 A_z^n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z^n}{\partial y^2} = -\mu_0 \delta_z, \quad (1)$$

(в дальнейшем индекс  $z$  опущен), а в области полюса (индекс  $f$ ) — уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2 A_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_f}{\partial y^2} = 0. \quad (2)$$

В зоне I должны соблюдаться следующие граничные условия:

$$\text{при } y=0 H_x=0 \text{ или } \frac{\partial A}{\partial y}=0; \quad (3)$$

$$\text{при } x=0 B_y=0 \text{ или } -\frac{\partial A^n}{\partial x}=0; \quad (4)$$

$$\text{при } x=t B_x=0 \text{ или } \frac{\partial A_f}{\partial y}=0; \quad (5)$$

$$\text{при } x=b A^n=A_f \quad (6)$$

$$\text{при } x=b \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A^n}{\partial x} = \frac{1}{\mu_f} \frac{\partial A_f}{\partial x}. \quad (7)$$

Решение для векторного потенциала в зоне I будем искать в виде

$$A_1 = A(x, y) + A_0(x, y), \quad (8)$$

где  $A(x, y)$  — решение однофазной системы уравнений

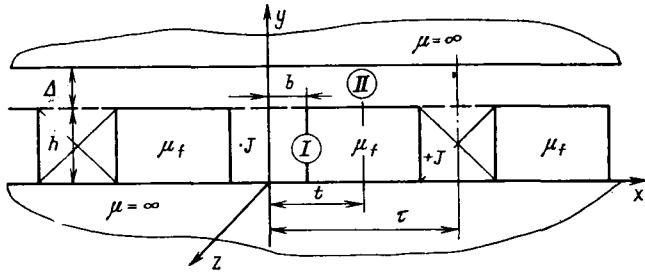


Рис. 1

(1) и (2);  $A_0(x, y)$  — частное решение (1) и (2) при  $n=0$ :

$$A(x, y) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{\infty} X_n^n(x) Y_n^n(y) & \text{— паз;} \\ \sum_{n=0}^{\infty} X_n^f(x) Y_n^f(y) & \text{— полюс;} \end{cases} \quad (9)$$

$$A(x, y) = \begin{cases} a_1 x^2 + b_1 y^2 + a_2 x + b_2 y + C_1 & \text{— паз;} \\ C_2 x + C_3 y + C_4 & \text{— полюс.} \end{cases} \quad (10)$$

Легко убедиться в том, что (10) удовлетворяет (1) и (2) при

$$a_1 + b_1 = -\frac{\mu_0 \delta}{2}. \quad (11)$$

С учетом граничных условий (3) — (7) в предположении, что при  $x=t$  векторный потенциал имеет значение, равное нулю (из-за симметрии поля линия  $x=t$  есть силовая линия), найдем

$$b_1 = a_2 = b_2 = C_4 = 0 \quad (12)$$

$$C_1 = \mu_f \delta b(t-b) + \mu_0 \delta b^2 / 2; \quad (13)$$

$$C_3 = \mu_f \delta b t; \quad (14)$$

$$C_2 = -\mu_f \delta b. \quad (15)$$

Функции  $X_n^n(x)$ ,  $Y_n^n(y)$  — для области паза и  $X_n^f(x)$ ,  $Y_n^f(y)$  — для области полюса определяются из решения обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, которые получаются из уравнений Лапласа для  $A^n(x, y)$ ,  $A^f(x, y)$  после разделения переменных и с учетом граничных условий (4), (5) имеют вид:

$$\left. \begin{array}{l} X_n^n(x) = C_{1n} \cos nx; \\ Y_n^n(y) = F_{1n} \operatorname{ch} ny; \\ X_n^f(x) = C_{2n} \sin n(t-x); \\ Y_n^f(y) = F_{2n} \operatorname{ch} ny. \end{array} \right\} \quad (16)$$

С учетом (16) из (9) имеем

$$A(x, y) = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{n=0}^{\infty} C_n^n \cos nx \operatorname{ch} ny \text{ — паз;} \\ \sum_{n=0}^{\infty} C_n^f \sin n(t-x) \operatorname{ch} ny \text{ — полюс,} \end{array} \right. \quad (17)$$

где

$$\left. \begin{array}{l} C_n^n = C_{1n} F_{1n}; \\ C_n^f = C_{2n} F_{2n}. \end{array} \right\} \quad (18)$$

Покажем далее, что числа  $n$  — собственные числа, т. е. таких чисел существует бесчисленное множество, все они различны и среди них нет чисел мнимых, а функции

$$A_n = \left\{ \begin{array}{l} C_n^n \cos nx; \\ C_n^f \sin n(t-x) \end{array} \right. \quad (19)$$

— собственные кусочно-непрерывные функции данной задачи.

Для этого сделаем подстановку (17) в (6) и (7) и, приравнивая почленно слагаемые с одинаковым  $n$ , най-

дем

$$\left. \begin{aligned} C_n^n \cos nb - C_n^f \sin n(t-b) &= 0; \\ C_n^n \sin nb - \frac{\mu_0}{\mu_f} C_n^f \cos n(t-b) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Система (20) разрешима, если равен нулю ее определитель:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \cos nb - \sin n(t-b) \\ \sin nb - \frac{\mu_0}{\mu_f} \cos n(t-b) \end{vmatrix} = 0. \quad (21)$$

Решение полученного уравнения позволяет отыскать теоретически бесконечный ряд собственных чисел  $n$ , каждое из которых обеспечивает нетривиальное решение системы (20) в виде

$$C_n^f = K_n C_n^n. \quad (22)$$

Следует отметить, что в рассматриваемом случае каждое число  $n$ , соответствующий этому числу коэффициент  $K_n$  и функция координаты  $y$  в (9) определенным образом характеризуют геометрию и физические свойства одновременно двух сред (полюс и межполюсное пространство), входящих составными частями в зону I расчетной модели.

Не вдаваясь пока в подробности решения уравнения (21), будем считать, что числа  $n$  и коэффициенты  $K_n$  определены. Используя далее (8), (9), (14) и (19) и опуская индекс «п» при коэффициенте  $C_n^n$ , запишем решения для векторного потенциала и компонент векторов магнитной напряженности и индукции в зоне I:

$$A_1 = \begin{cases} \sum_n C_n \cos nx \operatorname{ch} ny - \mu_0 \delta \frac{x^2}{2} + C_1 - \text{паз}; \\ \sum_n C_n K_n \sin n(t-x) \operatorname{ch} ny - \mu_f \delta b x + C_3 - \text{полюс}; \end{cases} \quad (23)$$

$$B_{y1} = -\frac{\partial A_1}{\partial x} = \begin{cases} \sum_n C_n n \sin nx \operatorname{ch} ny + \mu_0 \delta x - \text{паз}; \\ \sum_n C_n n K_n \cos n(t-x) \operatorname{ch} ny + \mu_f \delta b - \text{полюс}; \end{cases} \quad (24)$$

$$H_{x1} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_1}{\partial y} = \begin{cases} \frac{1}{\mu_0} \sum_n C_n n \cos nx \operatorname{sh} ny - \text{паз}; \\ \frac{1}{\mu_f} \sum_n C_n n K_n \sin n(t-x) \operatorname{sh} ny - \text{полюс}. \end{cases} \quad (25)$$

Решения (23) — (25) удовлетворяют уравнениям магнитостатики, отвечают граничным условиям (3) — (7) в зоне I, не являются тривиальными и, следовательно, могут быть взяты за исходные при решении поставленной задачи.

В области II (воздушный зазор) векторный потенциал удовлетворяет уравнению Лапласа, и его решение с учетом симметрии поля при отсутствии касательной к поверхности  $y=h+\Delta$  компоненты вектора напряженности можно представить в виде:

$$A_2 = \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} P_m \cos \frac{m\pi}{\tau} x \operatorname{ch} \frac{m\pi}{\tau} (h + \Delta - y) \quad (26)$$

и далее

$$B_{y2} = -\frac{\partial A_2}{\partial x} = \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} P_m \frac{m\pi}{\tau} \sin \frac{m\pi}{\tau} x \operatorname{ch} \frac{m\pi}{\tau} (h + \Delta - y); \quad (27)$$

$$H_{x2} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_2}{\partial y} = -\frac{1}{\mu_0} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} P_m \frac{m\pi}{\tau} \cos \frac{m\pi}{\tau} x \operatorname{sh} \frac{m\pi}{\tau} (h + \Delta - y) \quad (27a)$$

Неизвестные постоянные  $A_n$  в (23) — (25) и  $P_m$  в (26) и (27) могут быть определены из условий непрерывности соответствующих компонент векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  при переходе через границу ( $y=h$ ) раздела зон I и II:

$$\left. \begin{aligned} B_{1y}(x, h) &= B_{2y}(x, h); \\ H_{1x}(x, h) &= H_{2x}(x, h). \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Для реализации (28) решения (24) и (25) запишем для  $y=h$ :

$$\left. \begin{aligned} B_{1y}(x, h) &= \begin{cases} \sum_n C_n n \sin nx \operatorname{ch} nh + \mu_0 \delta x - \text{паз}; \\ \sum_n C_n n K_n \cos n(t-x) \operatorname{ch} nh + \mu_f \delta b - \text{полюс}; \end{cases} \\ H_{1x}(x, h) &= \begin{cases} \frac{1}{\mu_0} \sum_n C_n n \cos nx \operatorname{sh} nh - \text{паз}; \\ \frac{1}{\mu_f} \sum_n C_n n K_n \sin n(t-x) \operatorname{sh} nh - \text{полюс} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

и представим их в виде рядов, аналогичных (27),

$$\left. \begin{aligned} B_{1y}(x, h) &= \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} B_m \sin \frac{m\pi}{\tau} x; \\ H_{1x}(x, h) &= \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} H_m \cos \frac{m\pi}{\tau} x. \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Коэффициенты  $B_m$  и  $H_m$  определяются по формулам Эйлера. С учетом симметрии поля

$$\left. \begin{aligned} B_m &= \frac{2}{t} \int_0^t B_{1y}(x, h) \sin \frac{m\pi}{\tau} x dx; \\ H_m &= \frac{2}{t} \int_0^t H_{1x}(x, h) \cos \frac{m\pi}{\tau} x dx. \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

С учетом (29) и (30) имеем

$$B_m = \sum_n C_n n \operatorname{ch} nh \Psi_{n,m} + U_m. \quad (32)$$

Здесь

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{n,m} &= \frac{2}{t} \left[ \int_0^b \sin nx \sin \frac{m\pi}{\tau} x dx + \right. \\ &\quad \left. + K_n \int_b^t \cos n(t-x) \sin \frac{m\pi}{\tau} x dx \right]; \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

$$U_m = \frac{2}{t} \left[ \mu_0 \delta \int_0^b x \sin \frac{m\pi}{\tau} x dx + \mu_f \delta b \int_b^t \sin \frac{m\pi}{\tau} x dx \right] \quad (34)$$

и далее

$$H_m = \frac{1}{\mu_0} \sum_n C_n n \operatorname{sh} nh Q_{n,m}.$$

Здесь

$$Q_{n,m} = \frac{2}{t} \left[ \int_0^b \cos nx \cos \frac{m\pi}{\tau} x dx + K_n \frac{\mu_0}{\mu_f} \int_b^t \sin n(t-x) \cos \frac{m\pi}{\tau} x dx \right].$$

Из условий (28) с учетом (27) и (30) имеем

$$B_m = P_m \frac{m\pi}{\tau} \operatorname{ch} \frac{m\pi}{\tau} \Delta;$$

$$H_m = -\frac{1}{\mu_0} P_m \frac{m\pi}{\tau} \operatorname{sh} \frac{m\pi}{\tau} \Delta.$$

Исключая из этих уравнений  $P_m$ ,

$$\mu_0 H_m + B_m \operatorname{th} \frac{m\pi}{\tau} \Delta = 0,$$

и учитывая (32) и (35), найдем

$$\sum_n C_n n \operatorname{sh} nh \left[ \Psi_{n,m} \operatorname{cth} nh \operatorname{th} \frac{m\pi}{\tau} \Delta + Q_{n,m} \right] = -U_m \operatorname{th} \frac{m\pi}{\tau} \Delta. \quad (38)$$

Полученное выражение позволяет составить теоретически бесконечную систему алгебраических уравнений и, ограничиваясь порядком системы ( $K$ ), разрешать ее относительно неизвестных коэффициентов  $C_n$ . После определения коэффициентов  $C_n$  поставленную задачу можно считать решенной.

Рассмотрим конкретный пример, когда  $b=t/2=\tau/4$ . В этом случае уравнение (21) и система (20) имеют аналитическое решение

$$n = \frac{2}{t} (\nu \pi \pm \alpha), \quad n \text{ — положительны.} \quad (39)$$

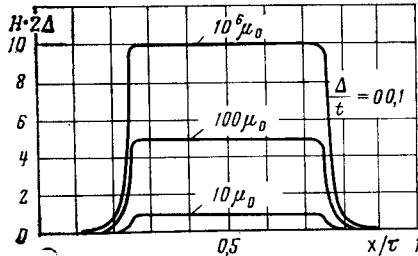


Рис. 2

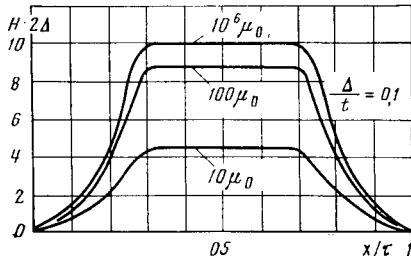


Рис. 3

$$(35) \quad \text{Здесь } \alpha = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\mu_0}{\mu_f}} \text{ (главное значение);}$$

$$v = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$K_n = \operatorname{ctg} n \frac{\pi}{2}.$$

Из (33) с учетом (38) и (39)

$$(36) \quad \Psi_{n,m} = \frac{2}{t} \frac{\frac{m\pi}{\tau} \cos \frac{m\pi}{4} \left( \sin n \frac{\pi}{2} - K_n \cos n \frac{\pi}{2} \right)}{n^2 - \left( \frac{m\pi}{\tau} \right)^2}. \quad (41)$$

Из (36) имеем

$$(37) \quad (37a) \quad Q_{n,m} = \frac{2}{t K_n} \frac{\frac{m\pi}{\tau} \sin \frac{m\pi}{4} \left( \sin n \frac{\pi}{2} - K_n \cos n \frac{\pi}{2} \right)}{n^2 - \left( \frac{m\pi}{\tau} \right)^2}. \quad (42)$$

Из (34) находим

$$U_m = \frac{\mu_0 \delta}{m\pi} \tau \left[ \frac{\mu_f}{\mu_0} \cos \frac{m\pi}{4} + \frac{4}{m\pi} \sin \frac{m\pi}{4} - \cos \frac{m\pi}{4} \right]. \quad (43)$$

Подстановка (41) — (43) в выражение (38) после несложных преобразований позволяет получить исходное для расчета коэффициентов  $C_n$  уравнение

$$\sum_n C_n^* \alpha_{n,m} = J_m. \quad (44)$$

Здесь

$$\alpha_{n,m} = \frac{C_n^* = C_n n \operatorname{sh} nh;}{\cos nt \cos \frac{m\pi}{4} \left( \operatorname{tg} \frac{m\pi}{4} + K_n \operatorname{ctg} nh \operatorname{th} \frac{m\pi}{\tau} \Delta \right)}; \\ \cos n \frac{\pi}{2} \left[ n^2 - \left( \frac{m\pi}{\tau} \right)^2 \right]$$

$$J_m = \mu_0 J_n \frac{\tau^2}{(m\pi)^2} \left( \frac{\mu_f}{\mu_0} \cos \frac{m\pi}{4} + \frac{4}{m\pi} \sin \frac{m\pi}{4} - \cos \frac{m\pi}{4} \right).$$

Из (44) имеем систему  $k$  уравнений:

$$\begin{aligned} C_1^* \alpha_{1,1} + C_2^* \alpha_{2,1} + C_3^* \alpha_{3,1} + \dots + C_k^* \alpha_{k,1} &= J_1; \\ C_1^* \alpha_{1,3} + C_2^* \alpha_{2,3} + C_3^* \alpha_{3,3} + \dots + C_k^* \alpha_{k,3} &= J_3; \\ \dots &\dots \\ C_1^* \alpha_{1,k} + C_2^* \alpha_{2,k} + C_3^* \alpha_{3,k} + \dots + C_k^* \alpha_{k,k} &= J_k. \end{aligned} \quad (45)$$

разрешимую относительно  $C_n^*$ .

Далее с учетом (37a) и (27a) может быть, к примеру, получено выражение для расчета амплитуд гармонических составляющих напряженности на поверхности  $y=h+\Delta$ :

$$H_{2ym} = \frac{4m\pi}{\tau^2 \mu_0} \frac{\sin \frac{m\pi}{4}}{\operatorname{sh} \frac{m\pi}{\tau} \Delta} \sum_n C_n^* \frac{\cos nt}{\cos n \frac{\pi}{2} \left[ n^2 - \left( \frac{m\pi}{\tau} \right)^2 \right]}. \quad (46)$$

На рис. 2, 3 представлены кривые распределения напряженности магнитного поля на поверхности  $y=h+\Delta$ , полученные при решении задачи на ЭВМ при порядке системы (45)  $k=50$  и следующих данных:  $t/\tau=0.5$ ;  $b/t=0.5$ ;  $\Delta/t=0.01$ ; и  $\Delta/t=0.1$ ;  $h/t=0.99$ ;  $\mu_f=10^6 \mu_0$ ;  $\mu_f=100 \mu_0$ ;  $\mu_f=10 \mu_0$ ;  $t=100$  ед. длины;  $I=10$  ед. тока.

| Значение $k$ | Значение амплитуды первой гармонической $2H_1\Delta$ |                                         |
|--------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
|              | $\mu_f = 10^8 \mu_0$ :<br>$\Delta/t = 0,01$          | $\mu_f = 10\mu_0$ :<br>$\Delta/t = 0,1$ |
| 1            | 10,167                                               | 4,830                                   |
| 3            | 8,8927                                               | 4,6360                                  |
| 5            | 8,6741                                               | 4,6170                                  |
| 7            | 8,5892                                               | 4,6110                                  |
| 9            | 8,5457                                               | 4,6090                                  |
| :            | :                                                    | :                                       |
| 50           | 8,4554                                               | 4,6000                                  |

В таблице представлены значения амплитуд первой гармонической напряженности ( $2H_1\Delta$ ), соответствующие различным порядкам  $k$  системы (45).

Из таблицы видно, что при оценке амплитуды первой гармонической напряженности в широком диапазоне изменения воздушного зазора и магнитной проницаемости полюса с достаточной для практики точностью можно ограничиться решением системы (45) третьего — пятого порядков.

**Выводы.** 1. При аналитическом исследовании электромагнитных процессов в электрических машинах с явновыраженными полюсами (в частности, в машинах постоянного тока, синхронных, индукторных, синхронно-реактивных, в машинах с постоянными магнитами) задачи о расчете магнитного поля в активном объеме машины целесообразно решать с помощью кусочно-непрерывных собственных функций.

2. Кусочно-непрерывные собственные функции могут быть с успехом использованы и при исследовании полей в локальных областях электрических машин с неявными полюсами. Такие задачи возникают при про-

ектировании, к примеру, асинхронных машин с полуоткрытыми и закрытыми пазами, с насыщенными шлицевыми зонами и зубцами, машин с магнитными клиньями и т. д.

3. Являясь частным случаем метода разделения переменных, предлагаемый метод, базирующийся на кусочных собственных функциях, не позволяет с высокой степенью точности исследовать распределение поля вблизи «острых кромок», однако при расчетах интегральных характеристик машин он дает хорошие практические результаты.

4. Главный недостаток метода разделения переменных при расчете поля в структурах с дискретной неоднородностью по двум направлениям обусловлен необходимостью приближенного решения бесконечной системы уравнений для отыскания постоянных интегрирования. Принципиально и кусочные функции не исключают этого недостатка.

Несмотря на это при решении подобных задач предпочтительными являются именно кусочные, а не гладкие собственные функции, так как уже первая кусочная гармоническая дает хорошее и качественное и количественное представление об истинной картине поля, в результате чего здесь при достаточной для практики точности можно ограничиться решением системы первого, третьего, пятого порядков.

#### Список литературы

- Инкин А. И. Аналитическое решение уравнений магнитного поля в дискретных структурах явнополюсных электрических машин. — Электричество, 1979, № 8.
- Инкин А. И. Аналитическое исследование магнитного поля в активном объеме электрической машины с постоянными магнитами. — Электричество, 1979, № 5.

[31.03.81]

УДК 621.314.632.012.6.001.24

## Внешние характеристики выпрямителя с поочередным регулированием

ЖЕМЕРОВ Г. Г., канд. техн. наук,  
КОВАЛЕНКО И. Т., инж.

Харьков

В двенадцатипульсных управляемых выпрямителях с последовательным включением мостов для уменьшения потребления реактивной мощности и улучшения энергетических характеристик применяют поочередное регулирование. Снижение потребляемой реактивной мощности преобразователя достигается тем, что в любой момент времени один из двух последовательных мостов находится в предельном выпрямительном или инверторном режиме.

Электромагнитные процессы в выпрямителях с поочередным регулированием более сложны, чем в выпрямителях с симметричным управлением вследствие сложного закона изменения углов управления вентильных групп и сложного характера влияния общей для вентильных групп индуктивности сети. Влияние на процессы в выпрямителях первого фактора при мгновенной коммутации тока в вентилях рассмотрено в [1], однако, принятые там допущение мгновенной коммутации при ре-

шении ряда задач является грубым. Влияние второго фактора для разности углов управления  $30^\circ$  и  $150^\circ$  рассмотрено в [2].

В преобразователях с поочередным регулированием в зависимости от соотношения между углами управления и тока нагрузки коммутации в мостах могут происходить одновременно или не совпадать во времени. Наличие общей для обоих мостов индуктивности со стороны питающей сети обуславливает взаимное влияние мостов при одновременной коммутации, что в ряде случаев существенно влияет на коммутацию токов и, следовательно, ведет к изменению наклона внешней характеристики преобразователя.

В настоящей статье рассматриваются внешние характеристики выпрямителя для различных соотношений между углами управления, причем предельные значения углов управления регулируются независимо или в функции тока нагрузки.

**Допущения и ограничения, принятые при анализе.** Вентильные группы выпрямителя (рис. 1) пытаются от источников переменного напряжения бесконечно большой мощности  $u_A$ ,  $u_B$ ,  $u_C$  через индуктивности  $L_0$  и трансформаторы  $T_{p1}$ ,  $T_{p2}$ , индуктивности рассеяния которых  $L$  приведены к их вентильным обмоткам. Кривая линейного напряжения второй вентильной группы  $u_{AB2}$  отстает от кривой  $u_{AB1}$  на  $30^\circ$ . Нагрузкой преобразователя является источник тока  $I_d$ . Будем рассматривать период повторяемости длительностью  $\pi/3$  от момента включения тиристора  $T_{11}$ .

Запишем некоторые соотношения, необходимые при расчетах. Индуктивность сопротивления фазы в контуре одиночной коммутации

$$x' = \omega_0 L + \frac{\omega_0 L_0}{(2k_{tp})^2}, \quad (1)$$

где  $\omega_0$  — круговая частота питающей сети;  $k_{tp}$  — коэффициент трансформации

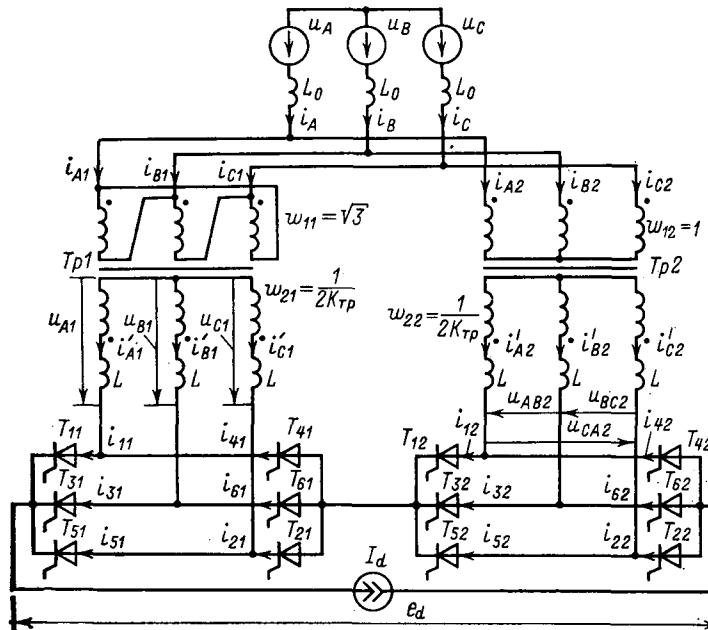


Рис. 1. Расчетная схема выпрямителя с поочередным регулированием

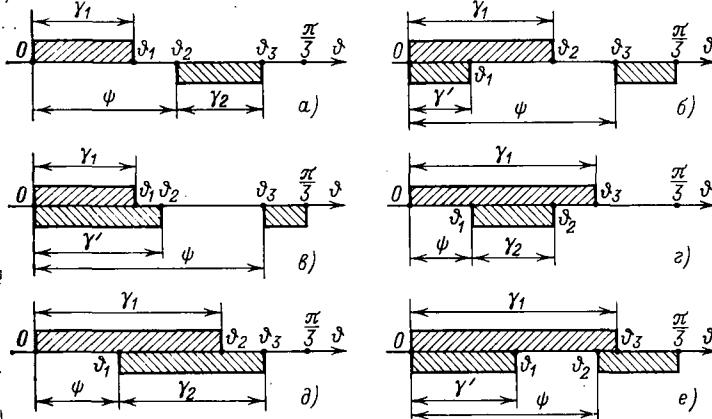


Рис. 2. Варианты взаимного расположения интервалов коммутации

Степень влияния общей индуктивности  $L_0$  характеризуется отношением индуктивных сопротивлений:

$$A = \frac{\omega_0 L_0}{x' (2k_{tp})^2}. \quad (2)$$

Напряжение идеального холостого хода выпрямителя

$$E_{d00} = \frac{6}{\pi} U_m = \frac{3\sqrt{3}}{\pi k_{tp}} U_{m,\phi}, \quad (3)$$

где  $U_m$  — амплитуда линейного напряжения вентильных обмоток;  $U_{m,\phi}$  — амплитуда фазного напряжения питающей сети.

Индуктивное сопротивление  $x'$  может быть получено через напряжение короткого замыкания из питающих трансформаторов

$$x' = \frac{e_k U_m}{2I_{dn}}, \quad (4)$$

где  $e_k$  — напряжение короткого замыкания трансформатора в долях номинального;  $I_{dn}$  — номинальный ток нагрузки выпрямителя.

Все соотношения будем записывать в относительных единицах, приняв в качестве базисных величин  $E_{d00}$  и  $I_{dn}$ .

В [3] показано, что вынужденные углы управления и погасания определяются из соотношения

$$\alpha_B = \arctg \frac{A\sqrt{3}}{4-3A}. \quad (5)$$

Диапазон изменения углов управления

$$\arctg \frac{A\sqrt{3}}{4-3A} \leq \alpha \leq \pi - \arctg \frac{A\sqrt{3}}{4-3A} - \delta, \quad (6)$$

где  $\delta$  — угол запирания тиристора.

Интервалы коммутации  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  ограничим периодом повторяемости выходного напряжения  $\pi/3$ , что практически соответствует всем рабочим режимам управляемого выпрямителя, напряжение короткого замыкания которого не превышает 10—15 %, а перегрузка по току — 2,25 номинального значения. Тогда возможны шесть вариантов взаимного расположения углов коммутации на периоде повторяемости выходного напряжения, иллюстрируемые рис. 2, где длина верхнего заштрихованного прямоугольника соответствует интервалу коммутации в первом мосте, а сумма длин нижних прямоугольников (если их два) — во втором. Угол  $\psi$  соответствует интервалу времени, через который включается тиристор во втором мосте после включения тиристора  $T_{11}$  в первом.

Будем рассматривать следующий закон поочередного регулирования:

в выпрямительном режиме

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \arctg \frac{A\sqrt{3}}{4-3A} = \text{const}; \\ \alpha_2 &= \text{var}, \arctg \frac{A\sqrt{3}}{4-3A} \leq \alpha_2 \leq \pi - \\ &\quad - \arctg \frac{A\sqrt{3}}{4-3A} - \delta - \gamma_2; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

в инверторном режиме

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_1 = \text{var}, \arctg \frac{A\sqrt{3}}{4-3A} \leq \alpha_1 \leq \alpha_2; \\ \alpha_2 = \text{const} = \pi - \arctg \frac{A\sqrt{3}}{4-3A} - \delta - \gamma_2. \end{array} \right\} \quad (8)$$

*Расчет выходного напряжения.* Согласно рис. 2 разбиваем период повторяемости выходного напряжения от  $\vartheta_0=0$  до  $\vartheta_0=\pi/3$  точками  $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$  на четыре интервала  $[\vartheta_{j-1}, \vartheta_j]$ , на каждом из которых мгновенные значения выходного напряжения

$$e_{dj*} = a_{j1} \sin(\vartheta + \alpha_1) + a_{j2} \sin\left(\vartheta + \alpha_1 - \frac{2\pi}{3}\right) + a_{j3} \sin\left(\vartheta + \alpha_1 - \frac{4\pi}{3}\right). \quad (9)$$

Угол коммутации может состоять из нескольких интервалов  $[\vartheta_{j-1}, \vartheta_j]$  (рис. 2, б—е), на каждом из них производная тока через включающийся тиристор  $T_{sk}$

$$\frac{di_{sh}}{d\vartheta} = C_{js} \sin(\vartheta + \alpha_1 + \varphi_{jk}), \quad s = 1, 2; \quad k = 1, 2, \dots, 6. \quad (10)$$

Пусть для заданных углов управления  $\alpha_1, \alpha_2$  и параметра нагрузки  $e_k I_d$ , где  $I_{d*} = I_d / I_{dh}$ , определены  $\gamma_1, \gamma_2$ , их взаимное расположение и коэффициенты  $a_{j1}, a_{j2}, a_{j3}$ . Тогда среднее значение выходного напряжения

$$U_{d*} = \frac{3}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{3}} e_{d*} d\vartheta = \frac{3}{\pi} \sum_{j=1}^4 \int_{\vartheta_{j-1}}^{\vartheta_j} e_{dj*} d\vartheta. \quad (11)$$

Для анализа и построения внешних характеристик удобно пользоваться формулами, выражающими зависимость среднего значения выходного напряжения от одного из углов коммутации, т. е.

$$\left. \begin{array}{l} U_{d*} = f_1(\alpha_1, \alpha_2, \gamma_1); \\ U_{d*} = f_2(\alpha_1, \alpha_2, \gamma_2). \end{array} \right\} \quad (12)$$

Для получения зависимостей (12) необходимо составить уравнение коммутаций для каждого моста. Поскольку интервалы коммутации в общем случае состоят из нескольких интервалов  $[\vartheta_{j-1}, \vartheta_j]$  с различными выражениями производных токов через включенный тиристор, то, пользуясь методом припасовки и соотношением (10), уравнения коммутаций для каждого моста можно записать в следующем виде:

$$\left. \begin{array}{l} 1 = \sum_j \int_{\vartheta_{j-1}}^{\vartheta_j} c_{j1} \sin(\vartheta + \alpha_1 + \varphi_{j1}) d\vartheta; \\ 1 = \sum_j \int_{\vartheta_{j-1}}^{\vartheta_j} c_{j2} \sin(\vartheta + \alpha_1 + \varphi_{j2}) d\vartheta. \end{array} \right\} \quad (13)$$

Суммирование в (13) производится по интервалам, на которые разбиваем углы  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ . Последние соотношения легко преобразуются к виду:

$$\left. \begin{array}{l} e_k I_{d*} = F_1(\alpha_1, \alpha_2, \gamma_1, \gamma_2); \\ e_k I_{d*} = F_2(\alpha_1, \alpha_2, \gamma_1, \gamma_2). \end{array} \right\} \quad (14)$$

Исключая из (11) и (14) сначала  $e_k I_{d*}$  и  $\gamma_2$ , а затем  $e_k I_{d*}$  и  $\gamma_1$ , получаем (12).

Аналогично из (14) получаем уравнения для опре-

деления интервалов коммутации при заданном  $e_k I_{d*}$ :

$$\left. \begin{array}{l} e_k I_{d*} = F_3(\alpha_1, \alpha_2, \gamma_1); \\ e_k I_{d*} = F_4(\alpha_1, \alpha_2, \gamma_2). \end{array} \right\} \quad (15)$$

Из (12) и (15) получаем уравнение внешней характеристики:

$$U_{d*} = F(e_k I_{d*}, \alpha_1, \alpha_2). \quad (16)$$

Очевидно, что для всевозможных  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , удовлетворяющих (7), (8), и допустимых  $e_k I_{d*}$  формулы (12), (15) и (16) будут различны. В приложении приведен пример вывода этих формул, соответствующих взаимному расположению углов коммутации на рис. 2, б и  $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1 < \pi/6$ .

Для получения единой формулы внешней характеристики преобразователя введем вспомогательные величины:

$$k_1 = \left\{ \begin{array}{ll} 0,5\sqrt{3} A & \text{при } 0 \leq \Delta\alpha < \pi/2; \\ 0 & \text{при } \pi/2 \leq \Delta\alpha < 5\pi/6; \\ -0,5\sqrt{3} A & \text{при } 5\pi/6 \leq \Delta\alpha < \pi; \end{array} \right. \quad (17)$$

$$k_2 = \left\{ \begin{array}{ll} 0,5\sqrt{3} A & \text{при } 0 \leq \Delta\alpha < \pi/6; \\ 0 & \text{при } \pi/6 \leq \Delta\alpha < \pi/2; \\ -0,5\sqrt{3} A & \text{при } \pi/2 \leq \Delta\alpha < \pi; \end{array} \right. \quad (18)$$

$I_{d1*}$  — относительное значение тока при наложении коммутаций через выходящий из работы тиристор первого моста в момент включения тиристора во втором мосте;  $I_{d2*}$  определяется аналогично.

Тогда, как показал анализ, уравнение внешней характеристики (16) принимает вид:

$$U_{d*} = E_{d*} - 0,5e_k I_{d*} - 0,5k_1 e_k I_{d1*} - 0,5k_2 e_k I_{d2*}, \quad (19)$$

где  $E_{d*}$  — внутренняя э. д. с. преобразователя;

$$E_{d*} = \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{2}. \quad (20)$$

Для вычисления величин  $e_k I_{d1*}$  и  $e_k I_{d2*}$  введем вспомогательные параметры:

$$\Psi_1 = \Psi; \quad \Psi_2 = \min\left(\frac{\pi}{3} - \psi, \pi - \alpha_b - \alpha_2 - \delta\right), \quad (21)$$

где  $\alpha_b$  вычисляется по (5);

$$r_i = \cos \alpha_i - \cos(\alpha_i + \psi_i), \quad i = 1, 2. \quad (22)$$

Значения величин  $e_k I_{d1*}$  и  $e_k I_{d2*}$  в зависимости от  $e_k I_{d*}$  имеют различные аналитические выражения:

при  $e_k I_{d*} \leq \min(r_1, r_2)$ ,  $j = 1, 2$

$$e_k I_{dj*} = 0;$$

при  $r_i < e_k I_{d*} \leq \frac{r_j + k_i r_i}{1 + k_i}$ ,  $i, j = 1, 2; i \neq j$

$$e_k I_{dj*} = 0; \quad e_k I_{di*} = e_k I_{d*} - r_i;$$

при  $\frac{r_j + k_i r_i}{1 + k_i} < e_k I_{d*} \leq e_k I_{dmax*}$ ,  $i, j = 1, 2; i \neq j$

$$e_k I_{dj*} = \frac{e_k I_{d*} (1 + k_i) - r_j - k_i r_i}{1 - k_i k_j},$$

где  $e_k I_{dmax*}$  — максимально допустимое значение  $e_k I_{d*}$ , которое определяется ограничением углов коммутации  $(\gamma_i \leq \frac{\pi}{3})$ .

Уравнения коммутации вида (15) и среднего значения выходного напряжения вида (12) для вариантов взаимного расположения углов коммутации, возможных как в выпрямительном, так и в инверторном режимах (рис. 2 $a$ ,  $b$ ,  $d$ ,  $e$ ), будут иметь вид

$$e_k I_{d*} + k_j e_k I_{d*} - r_i = q(p_i) [\cos(\alpha_i + \psi_i + \alpha_{bi}) - \cos(\alpha_i + \gamma_i + \alpha_{bi})]; \quad (24)$$

$$U_{d*} = 0,5 q(p_i) (1 + p_i) [\cos(\alpha_i + \gamma_i + \alpha_{bi}) + \cos(\alpha_j - \alpha_{bi})], \quad (25)$$

где  $i=j=1,2$ ;  $i \neq j$ ;

$$q(x) = \frac{\sqrt{x^2 - \sqrt{3}|x| + 1}}{1 - x^2}; \quad (26)$$

$$\alpha_{bi} = \begin{cases} \alpha(p_1) & \text{при } \Delta\alpha < \frac{\pi}{6}; \\ -\alpha(p_1) & \text{при } \frac{\pi}{6} \leq \Delta\alpha < \pi; \end{cases} \quad (27)$$

$$\alpha_{b2} = \alpha(p_2); \quad (28)$$

$$p_i = \operatorname{sign}(e_k I_{d*}) k_i; \quad (29)$$

$$\alpha(x) = \arctg \frac{x}{2 - \sqrt{3}|x|}. \quad (30)$$

Для вариантов взаимного расположения углов коммутации, имеющих место только в выпрямительном режиме (рис. 2,  $e$ ) или только в инверторном режиме (рис. 2,  $b$ ), уравнения коммутаций имеют вид:

$$e_k I_{d*} (1 + p_i) = q(p_j) [\cos(\alpha_i - \alpha_{bj}) - \cos(\alpha_i + \gamma_i - \alpha_{bj})], \quad i,j=1,2; \quad i \neq j. \quad (31)$$

Для тех же вариантов среднее значение выходного напряжения в функции интервалов коммутации вычисляется по формулам

$$U_{d*} = 0,5 [r_i p_i + \cos \alpha_j + \cos(\alpha_i + \gamma_i)]; \quad (32)$$

$$U_{d*} = 0,5 (1 + p_i) \{q(p_i) [\cos(\alpha_j + \gamma_j - \alpha_{bi}) + \cos(\alpha_j + \psi_j + \alpha_{bi})] + r_i\} \quad (33)$$

при  $i=1, j=2$  для выпрямительного режима и при  $i=2, j=1$  для инверторного.

При помощи полученных соотношений можно строить внешние характеристики преобразователя при независимом регулировании углов управления или при регулировании углов в функции тока нагрузки. В частности, при коммутационных процессах в мостах, не совпадающих во времени, или при  $A=0$  выражения (19) и (14) превращаются в известные формулы:

$$U_{d*} = E_{d*} - 0,5 e_k I_{d*};$$

$$e_k I_{d*} = \cos \alpha_i - \cos(\alpha_i + \gamma_i).$$

При наложении коммутаций в зависимости от  $\Delta\alpha$  коммутационные процессы могут как замедляться, так и ускоряться, что в свою очередь ведет к увеличению или к уменьшению наклона внешней характеристики. По (24), (31) можно определить длительность коммутации в мостах для заданных  $E_{d*}$  и  $e_k I_{d*}$ .

**Внешние характеристики.** При принятых ограничениях углов коммутации ( $\gamma_i \leq \pi/3$ ) в каждый момент времени в преобразователе могут быть одновременно включены 4, 5 или 6 вентилей, причем согласно рис. 2 существует шесть вариантов (режимов) чередования числа включенных тиристоров в периоде повторяемости выходного напряжения, которые приведены в таблице.

| Режим чередования числа включенных вентилей | Рисунок | Режим работы преобразователя |
|---------------------------------------------|---------|------------------------------|
| 5-4-5-4                                     | 2, a!   | выпрямитель, инвертор        |
| 6-5-4-5                                     | 2, б    | инвертор                     |
| 5-6-5-4                                     | 2, д    |                              |
| 6-5-6-5                                     | 2, е    |                              |
| 5-6-5-4                                     | 2, г    | выпрямитель                  |
| 6-5-4-5                                     | 2, в    | инвертор                     |

В зависимости от закона регулирования и значений углов управления с увеличением тока нагрузки режим 5-4-5-4 может переходить в режимы, соответствующие рис. 2,  $b$ ,  $d$ ,  $e$ .

При управлении тиристорами с помощью импульсов длительностью до  $10^\circ$  рассмотрим закон регулирования (7) в выпрямительном режиме при  $0 \leq E_{d*} \leq 1$  и

$$\alpha_2 = \arccos(2E_{d*} - \cos \alpha_1). \quad (34)$$

Углы управления  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  согласно (7) и (34) не зависят от тока нагрузки. Для заданных  $A$ ,  $E_{d*}$  и параметре нагрузки  $e_k I_{d*}$  по (19) можно определить среднее значение выходного напряжения. На рис. 3—5 в верхней части для различных значений  $A$  представлены семейства внешних характеристик при  $\delta=0$ , построенные с помощью формул (17) — (23). Пунктирные линии вместе с внешними характеристиками, построенными при  $\Delta\alpha=0, \pi/6, \pi/2, 5\pi/6$  ограничиваются на рис. 3—5 областями  $a, b, d, g, e$ , точки каждой из которых соответствуют одному варианту взаимного расположения углов коммутации по рис. 2,  $a, b, g, d, e$  (соответственно режимам чередования числа включенных вентилей). Например, область  $a$  соответствует режиму 5-4-5-4. Как видно из рис. 3—5, режим 5-4-5-4 в зависимости от величины  $\Delta\alpha$  с ростом  $e_k I_{d*}$  переходит в различные режимы. Так, при  $0 < \Delta\alpha < \pi/6$  в режим 6-5-4-5, который в свою очередь переходит в режим 6-5-6-5; переход в другой режим в этих случаях сопровождается увеличением наклона внешних характеристик. При  $\pi/6 < \Delta\alpha < \pi/2$  и  $\pi/2 < \Delta\alpha < 5\pi/6$  режим 5-4-5-4 при  $\alpha_2 < \alpha_r$  переходит в режим 5-6-5-4, а при  $\alpha_2 > \alpha_r$  в режим 6-5-4-5, где  $\alpha_r$  определяется из условия  $r_1 = r_2$  [ $r_i$  вычисляются по (22)]; причем переход одного режима в другой не всегда влечет за собой изменения наклона внешних характеристик. При  $5\pi/6 < \Delta\alpha < \pi$  режим 5-4-5-4 переходит в режим 5-6-5-4 с уменьшением наклона внешней характеристики.

При  $0 \leq \Delta\alpha < \pi/2$  наклон внешних характеристик может только увеличиваться, при  $\pi/2 < \Delta\alpha < \pi$  — только уменьшаться.

Отметим, что внешние характеристики выпрямителя на рис. 3—5 при  $\alpha_2 = \alpha_n$  соответствуют такому  $E_{d*}$ , для которого при  $\gamma_1 = \pi/3$  выполняется условие  $\gamma_2 + \varphi_1 = \pi/3$ .

В инверторном режиме рассмотрим следующий закон регулирования:

для заданного  $E_{d*} (-1 \leq E_{d*} \leq 0)$  при  $e_k I_{d*} = 0$

$$\alpha_2 = \pi - \alpha_b - \delta, \quad \alpha_1 = \arccos[2E_{d*} - \cos \alpha_2]; \quad (35)$$

с увеличением  $e_k I_{d*}$  угол  $\alpha_1$  не изменяется, а  $\alpha_2$  регулируем так, чтобы выполнялось условие

$$\alpha_2 + \gamma_2 = \pi - \alpha_b - \delta, \quad \alpha_2 \geq \alpha_1. \quad (36)$$

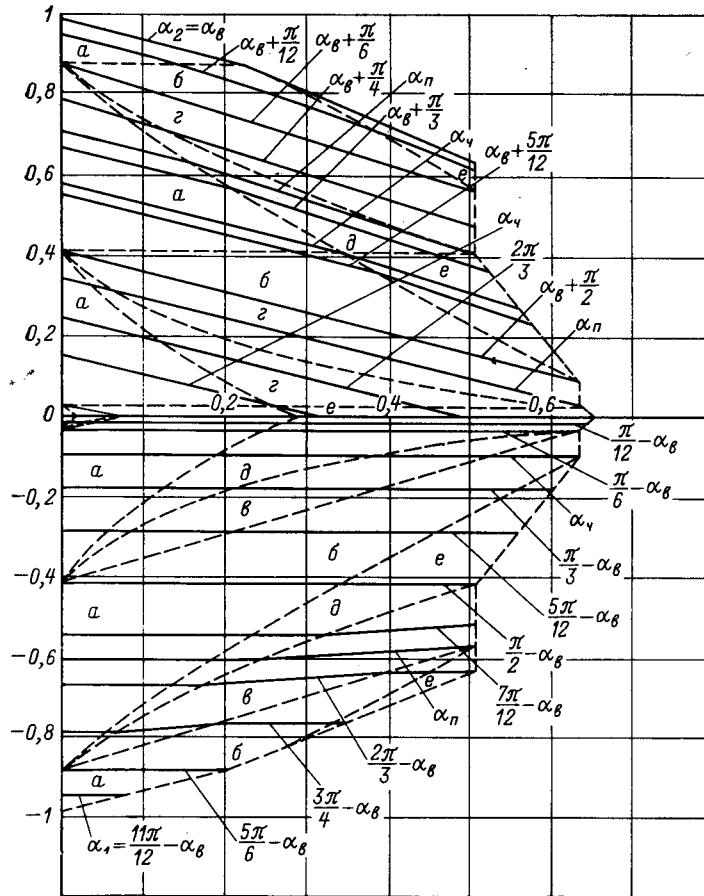


Рис. 3. Внешние характеристики выпрямителя с поочередным регулированием ( $A=0,3$ ;  $\alpha_B=0,1661$ ) — внешние характеристики; — — — — граничные линии режимов

В нижней части рис. 3—5 представлены семейства внешних характеристик преобразователя в инверторном режиме с законом регулирования (35) — (36) при  $\delta=0$ , построенных с помощью (24) — (33). Наличие прямолинейных участков внешних характеристик с абсолютной жесткостью объясняется тем, что среднее значение падения напряжения, вызванного коммутационными процессами, компенсируется увеличением внутренней э. д. с. преобразователя за счет регулирования  $\alpha_2$ . Коэффициент наклона внешней характеристики может быть отличен от нуля в режиме 6-5-4-5, имеющем место только в режиме инвертирования (рис. 2, в), причем когда оба моста находятся в инверторном режиме для этого случая коэффициент наклона больше нуля, а когда первый мост находится в выпрямительном режиме — меньше нуля.

■ Предложенный закон регулирования позволяет полностью использовать выпрямитель по напряжению.

Приложение. Электромагнитные процессы выпрямителя согласно рис. 1 описываются системой уравнений

$$i_A + i_B + i_C = 0;$$

$$i_A = \frac{1}{2\sqrt{\frac{3}{2}k_{Tp}}} (i'_{A1} - i'_{C1}) + \frac{1}{2k_{Tp}} i'_{A2};$$

$$i_B = \frac{1}{2\sqrt{\frac{3}{3}} k_{Tp}} (i'_{B1} - i'_{A1}) + \frac{1}{2k_{Tp}} i'_{B2},$$

$$i_C = \frac{1}{2\sqrt{3}k_{Tp}}(i'_{C1} - i'_{B1}) + \frac{1}{2k_{Tp}}i'_{C2},$$

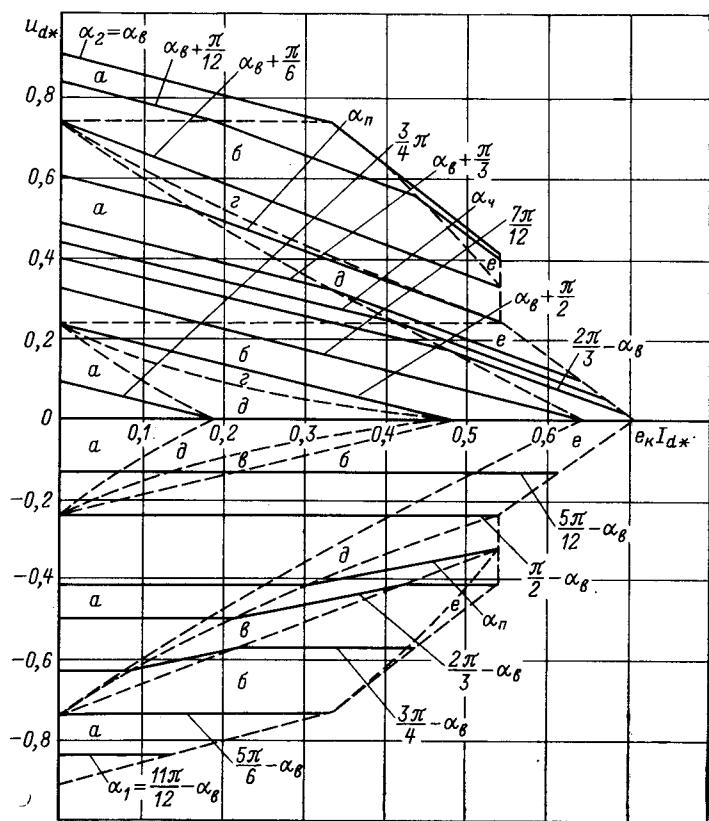


Рис. 4. Внешние характеристики выпрямителя с поочередным регулированием ( $A=0,6$ ;  $\alpha_B=0,4413$ ) — внешние характеристики; — — — — граничные линии режимов

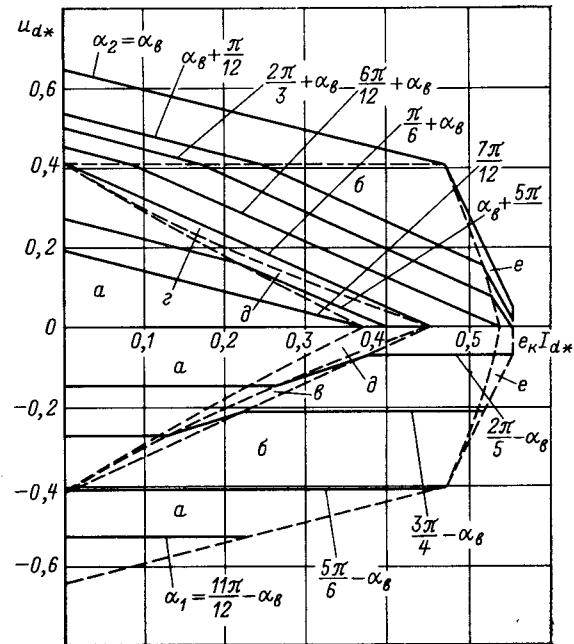


Рис. 5. Внешние характеристики выпрямителя с поочередным регулированием ( $A=0,9$ ,  $\alpha_b=0,8757$ ) — внешние характеристики; — — — граничные линии режимов.

$$i'_{A1} + i'_{B1} + i'_{C1} = 0, \quad i'_{A2} + i'_{B2} + i'_{C2} = 0;$$

$$u_{A1} = \left( u_A - u_B - x_0 \frac{di_A}{d\vartheta} + x_0 \frac{di_B}{d\vartheta} \right) \frac{1}{2 \sqrt{\frac{3}{3} k_{tp}}} - x \frac{di'_{A2}}{d\vartheta};$$

$$\begin{aligned}
 u_{B1} &= \left( u_B - u_C - x_0 \frac{di_B}{d\vartheta} + x_0 \frac{di_C}{d\vartheta} \right) \frac{1}{2\sqrt{3} k_{tp}} - x \frac{di'_{B1}}{d\vartheta}; \\
 u_{C1} &= \left( u_B - u_A - x_0 \frac{di_C}{d\vartheta} + x_0 \frac{di_A}{d\vartheta} \right) \frac{1}{2\sqrt{3} k_{tp}} - x \frac{di'_{C1}}{d\vartheta}; \\
 u_{AB2} &= \left( u_A - u_B - x_0 \frac{di_A}{d\vartheta} + x_0 \frac{di_B}{d\vartheta} \right) \frac{1}{2k_{tp}} - \\
 &\quad - x \frac{di'_{A2}}{d\vartheta} + x \frac{di'_{B2}}{d\vartheta}; \\
 u_{BC2} &= \left( u_B - u_C - x_0 \frac{di_B}{d\vartheta} + x_0 \frac{di_C}{d\vartheta} \right) \frac{1}{2k_{tp}} - \\
 &\quad - x \frac{di'_{B2}}{d\vartheta} + x \frac{di'_{C2}}{d\vartheta}; \\
 u_{CA2} &= \left( u_C - u_A - x_0 \frac{di_C}{d\vartheta} + x_0 \frac{di_A}{d\vartheta} \right) \frac{1}{2k_{tp}} - \\
 &\quad - x \frac{di'_{C2}}{d\vartheta} + x \frac{di'_{A2}}{d\vartheta}, \tag{37}
 \end{aligned}$$

где  $x_0 = \omega_0 L_0$ ;  $x = \omega_0 L$ ;  $\vartheta = \omega_0 t$ .

При  $0 < \Delta\alpha < \pi/6$  и взаимном расположении углов коммутации согласно рис. 2, б на интервале  $[0, \vartheta_1]$  включены шесть вентилей: 51, 61, 11, 42, 52, 62; на интервале  $[\vartheta_1, \vartheta_2]$  — 51, 61, 11, 52, 62; на интервале  $[\vartheta_2, \vartheta_3]$  — 61, 11, 52, 62; на интервале  $[\vartheta_3, \pi/3]$  — 61, 11, 52, 62, 12.

Определим мгновенное значение выходного напряжения и производные токов через включающиеся тиристоры на интервале  $[0, \vartheta_1]$ . Для этого составим уравнение коммутаций

$$\begin{cases} u_{A1} = u_{C1}; \\ u_{AB2} = 0. \end{cases} \tag{38}$$

Используя справедливые для этого случая соотношения

$$\begin{aligned}
 i_{11} + i_{51} &= I_d, \quad i_{11} = i'_{A1}, \quad i_{51} = i'_{C1}; \\
 i_{42} + i_{62} &= I_d, \quad i_{42} = -i'_{A2}, \quad i_{62} = -i'_{B2}
 \end{aligned}$$

и систему уравнений (37), преобразуем уравнения коммутаций (38):

$$\begin{cases} \frac{\sqrt{3} u_A}{2k_{tp}} - 2x' \frac{di_{11}}{d\vartheta} - x_0 \frac{\sqrt{3}}{(2k_{tp})^2} \frac{di_{62}}{d\vartheta} = 0; \\ \frac{u_A - u_B}{2k_{tp}} - x_0 \frac{\sqrt{3}}{(2k_{tp})^2} \frac{di_{11}}{d\vartheta} - 2x' \frac{di_{62}}{d\vartheta} = 0. \end{cases} \tag{39}$$

Решая (39) относительно  $\frac{di_{11}}{d\vartheta}$  и  $\frac{di_{62}}{d\vartheta}$ , получаем:

$$\begin{cases} \frac{di_{11}}{d\vartheta} = \frac{\sqrt{3} [(2-A) u_A + A u_B]}{2x' k_{tp} (4 - 3A^2)} = \\ + \frac{\sqrt{3} U_{M,\Phi}}{4x' k_{tp}} q \sin(\vartheta + \alpha_1 - \alpha_B); \\ \frac{di_{62}}{d\vartheta} = \frac{(2 - 3A) u_A - 2u_B}{2x' k_{tp} (4 - 3A^2)} = \\ = \frac{\sqrt{3} U_{M,\Phi}}{4x' k_{tp}} q \sin(\vartheta + \alpha_1 + \alpha_6 + \frac{\pi}{6}), \end{cases} \tag{40}$$

где  $q = \frac{2\sqrt{4 - 6A + 3A^2}}{4 - 3A^2}$ ;  $\alpha_B$  вычисляется по (5).

Мгновенное значение выходного напряжения:

$$\begin{aligned}
 e_d &= e_{d1} + e_{d2} = u_{A1} - u_{B1} + u_{CA2} = \\
 &= \frac{\sqrt{3} [3A^2 - 2 + A(\sqrt{3} - 1)]}{2k_{tp}(4 - 3A^2)} u_A + \\
 &+ \frac{\sqrt{3} [A - 4 + A^2(3 + \sqrt{3})]}{2k_{tp}(4 - 3A^2)} u_B + \frac{6 - 3A^2}{2k_{tp}(4 - 3A^2)} u_C.
 \end{aligned}$$

Перейдем к относительным единицам, взяв в качестве базисных величин  $E_{d00}$ ,  $I_{dH}$ :

$$\begin{cases} \frac{di_{11*}}{d\vartheta} = \frac{q}{e_R I_{d*}} \sin(\vartheta + \alpha_1 - \alpha_B); \\ \frac{di_{62*}}{d\vartheta} = \frac{q}{e_R I_{d*}} \sin(\vartheta + \alpha_1 + \alpha_6 + \frac{\pi}{6}); \end{cases} \tag{41}$$

$$\begin{aligned}
 e_{d*} &= \frac{\pi}{6(4 - 3A^2)} \{ [3A^2 - 2 + A(\sqrt{3} - 1)] \sin(\vartheta + \alpha_1) + \\
 &+ [A - 4 + A^2(3 + \sqrt{3})] \sin(\vartheta + \alpha_1 - \frac{2\pi}{3}) + \\
 &+ \sqrt{3} (2 - A^2) \sin(\vartheta + \alpha_1 - \frac{4\pi}{3}) \}. \tag{42}
 \end{aligned}$$

Таким образом для участка  $[0, \vartheta_1]$  получены формулы, позволяющие определять мгновенные значения выпрямленного напряжения и производных токов через включающиеся тиристоры.

На остальных участках поступаем аналогичным образом:

В интервале  $[\vartheta_1, \vartheta_2]$

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{11*}}{d\vartheta} &= \frac{\sin(\vartheta + \alpha_1)}{e_R I_{d*}}, \\
 e_{d*} &= -\frac{\pi (2 + \sqrt{3})}{12\sqrt{3}} \left[ \sin(\vartheta + \alpha_1 - \frac{2\pi}{3}) - \right. \\
 &\quad \left. - \sin(\vartheta + \alpha_1 - \frac{4\pi}{3}) \right];
 \end{aligned}$$

в интервале  $[\vartheta_2, \vartheta_3]$

$$\begin{aligned}
 e_{d*} &= -\frac{\pi (\sqrt{3} + 1)}{6\sqrt{3}} \sin(\vartheta + \alpha_1 - \frac{2\pi}{3}) + \\
 &+ \frac{\pi}{6\sqrt{3}} \sin(\vartheta + \alpha_1 - \frac{4\pi}{3});
 \end{aligned}$$

в интервале  $[\vartheta_3, \frac{\pi}{3}]$

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{12*}}{d\vartheta} &= \frac{\sin(\vartheta + \alpha_1 - \frac{\pi}{6})}{e_R I_{d*}}, \\
 e_{d*} &= -\frac{\pi (\sqrt{3} + 2)}{12} \sin(\vartheta + \alpha_1 - \frac{2\pi}{3}).
 \end{aligned}$$

Полученные соотношения представляют частные случаи соотношений (9) и (10). Согласно (13) или (14) уравнения для определения углов коммутации будут иметь вид:

$$\begin{cases} e_R I_{d*} = q [\cos(\alpha_1 - \alpha_B) - \cos(\alpha_1 + \gamma' - \alpha_B) + \\ + \cos(\alpha_1 + \gamma') - \cos(\alpha_1 + \gamma_1)]; \\ e_R I_{d*} = \cos \alpha_2 - \cos(\alpha_1 + \frac{\pi}{6}) + q [\cos(\alpha_1 + \alpha_B + \frac{\pi}{6}) - \\ - \cos(\alpha_1 + \gamma' + \alpha_B + \frac{\pi}{6})]. \end{cases} \tag{43}$$

С использованием соотношения  $\gamma' = \gamma_2 - \frac{\pi}{6} + \Delta\alpha$  уравнения (43) приводятся к виду (15):

$$\left. \begin{aligned} e_R I_{d*} &= \left\{ \cos \alpha_1 - \cos(\alpha_1 + \gamma_1) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{A \sqrt{3}}{2} \left[ \cos \alpha_2 - \cos \left( \alpha_1 + \frac{\pi}{6} \right) \right] \right\} / \left( 1 + \frac{A \sqrt{3}}{2} \right); \\ e_R I_{d*} &= \cos \alpha_2 - q \left[ \cos(\alpha_2 + \gamma_2 - \alpha_B) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{A \sqrt{3}}{2} \cos(\alpha_1 - \alpha_B) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

Из (11) и (43) после преобразований имеем среднее значение выходного напряжения

$$\left. \begin{aligned} U_{d*} &= \frac{\cos \alpha_2 + \cos(\alpha_1 + \gamma_1)}{2}; \\ U_{d*} &= \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{A \sqrt{3}}{2} \right) q [\cos(\alpha_1 - \alpha_B) + \cos(\alpha_2 + \gamma_2 + \alpha_B)]. \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

Легко поверить, что для этого случая соотношения (44) совпадает с (24), а (45) — с (25).

Из (44) и (45) получаем уравнение внешней характеристики:

$$U_{d*} = E_{d*} - 0,5e_R I_{d*} + (1 + 0,5k_2)e_R I_{d2*},$$

которое с использованием (17), (18) и (23) преобразуется к виду (19):

$$U_{d*} = E_{d*} - 0,5e_R I_{d*} - 0,5k_2 e_R I_{d2*}.$$

Аналогичным образом были получены и проверены соотношения (19), (24), (25), (31) — (33) для всех остальных вариантов взаимного расположения углов коммутации во всем диапазоне изменения  $\Delta\alpha$ .

### Список литературы

1. Мощные управляемые выпрямители для электроприводов постоянного тока/Э. М. Альтер, Г. Г. Жемеров, И. И. Левитан, Л. Г. Элькин.— М.: Энергия, 1975.
2. Пономарев В. А., Моргун С. И. Взаимовлияние мостов в преобразователе с поочередным регулированием. Электротехника, 1978, № 2.
3. Жемеров Г. Г. Вынужденные углы управления и погасания выпрямителя с поочередным регулированием. Электротехника, 1975, № 5.

[04.02.82]

УДК 621.372.061

## Анализ стабилизирующих свойств параметрических источников тока

ВАДАЧКОРИЯ Г. В. канд. техн. наук  
Грузинский политехнический институт

Известно, что на базе реактивных элементов (дронселей и конденсаторов) могут быть разработаны преобразователи источников напряжения в источники тока — параметрические источники тока (ПИТ), обеспечивающие инвариантность потребляемого тока при изменении сопротивления нагрузки [1].

В реальном преобразователе ввиду конечного значения добротности преобразующих элементов, а также в силу ряда других причин с изменением сопротивления нагрузки значение выходного тока не остается постоянным. Поэтому вопросы, связанные с исследованием стабилизирующих свойств преобразователей, при учете реальных параметров входящих в них элементов, являются актуальными.

Исследование стабилизирующих свойств ПИТ посвящено значительное число работ [1—5]. В них анализируются преобразователи в основном при чисто активном характере сопротивления нагрузки; при этом для получения основных выводов о степени стабилизации выходного тока, как правило, используется выражение для выходного тока в произвольном режиме сопротивления нагрузки. В связи с этим представляет теоретический и практический интерес исследование стабилизирующих свойств ПИТ с учетом характера и диапазона изменения сопротивления нагрузки без определения выходного тока в какой-либо конкретной схеме.

Предположим, что источник питания, выполненный по некоторой схеме, является преобразователем источника напряжения в источник тока. Согласно теореме об эквивалентном источнике напряжения указанную схему по отношению нагрузочной ветви можно представить в виде рис. 1, где преобразующая часть схемы обозна-

чена прямоугольником. Она представляет собой активный двухполюсник и может быть сколь угодно сложной конфигурации.

Следуя теореме об эквивалентном источнике напряжения для тока нагрузочной ветви, получаем:

$$I_1 = \frac{U_0}{Z_0 + Z_1}, \quad (1)$$

где  $Z_0$  — входное сопротивление пассивного двухполюсника (сопротивление преобразующей части схемы ПИТ), получающегося из заданного активного двухполюсника, после того, как все э. д. с. источников напряжения приняты равными нулю;  $U_0$  — напряжение между точками 1 и 2 схемы рис. 1 при  $Z_1 = \infty$ ;  $Z_1$  — сопротивление нагрузочной ветви при произвольном сопротивлении нагрузки  $Z_n = R_n + jX_n$ .

Стабилизирующие свойства схемы ПИТ можно оценить отношением текущего значения тока нагрузки к его значению в базовом режиме сопротивления нагрузки:

$$\delta = \frac{I_1}{I_{1B}} = \frac{Z_0 + Z_{1B}}{Z_0 + Z_1}, \quad (2)$$

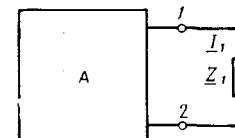


Рис. 1. К теореме об эквивалентном источнике напряжения

где  $Z_{16}$  — сопротивление нагрузочной ветви ПИТ в базовом режиме сопротивления нагрузки  $Z_{n.b} = R_{n.b} + jX_{n.b}$ .

В качестве базовой можно принять любой фиксированный режим (кроме режима холостого хода) сопротивления нагрузки.

Равенство (2) является общим и на его основе можно оценить стабильность выходного тока ПИТ любой структуры и любого назначения, если при этом элементы схемы являются линейными. Так, на основе (2) можно оценить стабилизирующие свойства схемы ПИТ при наличии в схеме дополнительного элемента в цепи нагрузки [1 и 2] для регулирования уровня стабилизированного тока и т. д.

Из (2) с учетом определения  $Z_0$  следует, что элементы преобразующей части схемы, включенные параллельно с источниками э. д. с., не влияют на степень стабилизации ПИТ. Такой результат получается, например, в П-образных схемах ПИТ. Анализируя последнее выражение, видим, что абсолютная неизменность выходного тока ПИТ при изменении сопротивления нагрузки получается в том случае, когда сопротивление преобразующей части схемы

$$Z_0 = \infty. \quad (3)$$

Равенство (3) является общим условием преобразования системы неизменного напряжения в систему неизменного тока для всех схем ПИТ любой структуры. На основе (3) заключаем, что в качестве преобразователя можно использовать лишь реактивные двухполюсники с элементами обоих типов.

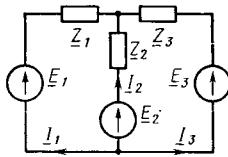


Рис. 2. Обобщенная трехлучевая схема ПИТ

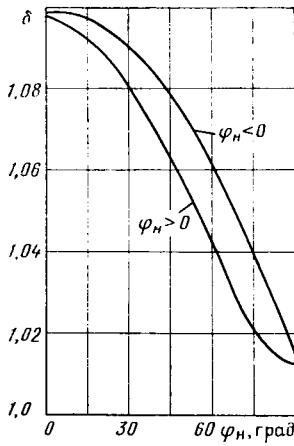


Рис. 3. Графики зависимостей изменения относительной величины выходного тока ПИТ в зависимости от аргумента комплексного сопротивления нагрузки при  $n_h=1$ ,  $Q=10$  и  $\lambda_a=\lambda_p=0$ ,  $\lambda_{a.b}=\lambda_{p.b}=1$ ,  $k_L=k_C=k_\omega=1$

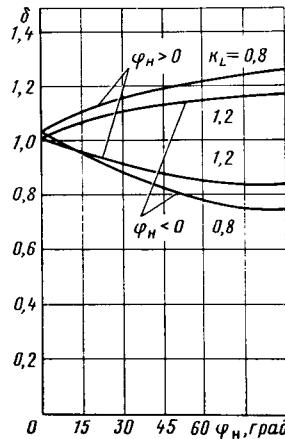


Рис. 4. Графики зависимостей изменения относительной величины выходного тока ПИТ в зависимости от аргумента комплексного сопротивления нагрузки и коэффициента k\_L при  $n_h=1$ ,  $Q_0=\infty$ ,  $\lambda_a=\lambda_p=0$ ,  $\lambda_{a.b}=\lambda_{p.b}=1$ ,  $k_C=k_\omega=1$

В реальном преобразователе из-за нарушения определенного соотношения между параметрами преобразующих элементов, а также из-за конечной добротности его элементов, нельзя реализовать условие (3). Поэтому реализация схемы ПИТ любой структуры возможна лишь с некоторым приближением.

В [6] показано, что единый подход к описанию режимов работы и нахождение расчетных соотношений для большинства схем ПИТ основаны на анализе зависимостей, получаемых для трехлучевой схемы ПИТ, изображенной в общем виде на рис. 2. Поэтому для иллюстрации применения приведенной методики определения  $\delta$  в качестве примера рассмотрим ПИТ трехлучевой структуры без дополнительного элемента в цепи нагрузки ( $Z_1 = Z_n$ ;  $Z_{16} = Z_{n.b}$ ).

Предположим, что во вторую и третью ветви схемы (рис. 2 включены преобразующие элементы. Пусть  $Z_2 = R + jk_\omega k_L \omega_0 L_0$  и  $Z_3 = -j/k_\omega k_C \omega_0 C_0$ ; здесь  $k_L$ ,  $k_C$ ,  $k_\omega$  — коэффициенты, показывающие во сколько раз параметр ( $L = k_L L_0$ ,  $C = k_C C_0$ ,  $\omega = k_\omega \omega_0$  [5]) реального преобразователя отличается от того же параметра ( $L_0$ ,  $C_0$ ,  $\omega_0$ ) при режиме постоянства выходного тока ПИТ.

Предположим далее, что сопротивление нагрузки в номинальном режиме  $Z_{n.h} = R_{n.h} + jX_{n.h}$ . Тогда, обозначая коэффициенты вариации активной и реактивной составляющих сопротивления нагрузки через  $\lambda_a = R_n / R_{n.h}$  и  $\lambda_p = X_n / X_{n.h}$  для  $Z_1$  и  $Z_{16}$  получаем:

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= Z_n = \omega_0 L_0 n_h (\lambda_a \cos \varphi_n + j\lambda_p \sin \varphi_n); \\ Z_{16} &= Z_{n.b} = \omega_0 L_0 n_h (\lambda_{a.b} \cos \varphi_n + j\lambda_{p.b} \sin \varphi_n), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $n_h = Z_{n.h} / \omega_0 L_0$  — номинальная величина относительной нагрузки;

$$\lambda_{a.b} = R_{n.b} / R_{n.h}; \quad \lambda_{p.b} = X_{n.b} / X_{n.h}; \quad \varphi_n = \arg(Z_{n.h});$$

$$a = k_\omega \text{ при } \varphi_n > 0; \quad a = 1/k_\omega \text{ при } \varphi_n < 0.$$

Обозначим добротность дросселя через  $Q = \omega L / R = k_\omega k_L Q_0$ ; ( $Q_0 = \omega_0 L_0 / R$ ).

Тогда с учетом того, что для схемы рис. 2

$Z_0 = Z_2 Z_3 / Z_2 + Z_3$  и при режиме постоянства выходного тока ПИТ должно выполняться условие  $\omega_0^2 L_0 C_0 = 1$  [1—4], выражение (2) запишется в виде:

$$\frac{\delta}{Q} = \frac{k_\omega k_L Q_0 - j + n_h (\lambda_{a.b} \cos \varphi_n + j\lambda_{p.b} \sin \varphi_n) \times \left[ k_\omega k_C + jQ_0 (k_\omega^2 k_L k_C - 1) \right]}{k_\omega k_L Q_0 - j + n_h (\lambda_a \cos \varphi_n + j\lambda_p \sin \varphi_n) \times \left[ k_\omega k_C + jQ_0 (k_\omega^2 k_L k_C - 1) \right]}. \quad (5)$$

Как видно, помимо параметров схемы на точность стабилизации выходного тока ПИТ влияют коэффициент мощности и характер сопротивления нагрузки. В качестве примера на рис. 3 приведены кривые зависимости  $\delta = f(\varphi_n)$  в полном диапазоне изменения сопротивления нагрузки ( $\lambda_a = \lambda_p = 0$ ) и при  $n_h = 1$ ,  $\lambda_{a.b} = \lambda_{p.b} = 1$  для случая, когда режим постоянства выходного тока ПИТ нарушается только из-за конечной добротности ( $Q = Q_0 = 10$ ) дросселя.

На основе (5) можно также оценить стабилизирующие свойства трехлучевой схемы ПИТ при отклонении значения одного из коэффициентов ( $k_L$ ,  $k_C$ ,  $k_\omega$ ) от единицы. Подставляя в (5)  $Q_0 = \infty$ , для относительного тока нагрузки при  $\lambda_a = \lambda_p = 0$  и  $\lambda_{a.b} = \lambda_{p.b} = 1$  получаем

$$\delta = \sqrt{\left[ \left( k_{\omega} k_C - \frac{1}{k_{\omega} k_L} \right) n_H \cos \varphi_H \right]^2 + \left[ 1 - a n_H \sin \varphi_H \left( k_{\omega} k_C - \frac{1}{k_{\omega} k_L} \right) \right]^2}. \quad (6)$$

Анализируя последнее выражение видим, что при активном характере сопротивления нагрузки зависимость  $\delta$  от одного из коэффициентов ( $k_L$ ,  $k_C$ ,  $k_{\omega}$ ) при остальных равных единице, имеет вид U-образной кривой с минимумом, равном единице в точке  $k_L = k_C = k_{\omega} = 1$ . Кроме того, величина относительного тока нагрузки тем больше, чем больше номинальное значение относительной нагрузки.

На основе анализа выражений (6) приходим к выводу о том, что при отклонении значения одного из коэффициентов ( $k_L$ ,  $k_C$ ,  $k_{\omega}$ ) от единицы стабильность выходного тока ПИТ улучшается с увеличением коэффициента мощности нагрузки, если при активно-индуктивной нагрузке  $k < 1$  ( $k = k_L$  при  $k_C = k_{\omega} = 1$ ;  $k = k_C$  при  $k_L = k_{\omega} = 1$  и  $k = k_{\omega}$  при  $k_L = k_C = 1$ ). При отклонении значения одного из коэффициентов ( $k_L$ ,  $k_C$ ,  $k_{\omega}$ ) от единицы стабильность выходного тока ПИТ с увеличением коэффициента мощности нагрузки также улучшается при активно-емкостной нагрузке, если  $k > 1$ . Ясно, что в указанных случаях зависимости  $\delta = f(\varphi_H)$  являются восходящими.

Согласно (6) при активно-индуктивной нагрузке и при отклонении значения одного из коэффициентов ( $k_L$ ,  $k_C$ ,  $k_{\omega}$ ) от единицы, зависимость  $\delta = f(\varphi_H)$  является нисходящей, (с начальной ординатой  $\delta > 1$  при  $\varphi_H = 0$ ), если  $k > 1$ , а при активно-емкостной нагрузке, если  $k < 1$ ). Поэтому в указанных случаях стабильность выходного тока ПИТ ниже, чем при активном характере сопротивления нагрузки, если  $|\varphi_H| > |\varphi_{H.K}|$ . В противном случае, т. е., когда  $|\varphi_H| < |\varphi_{H.K}|$ , стабильность выходного тока при смешанном характере сопротивления нагрузки выше, чем при активном его характере (здесь  $\varphi_{H.K}$  — критическое значение аргумента комплексного сопротивления нагрузки, при котором приращение относительного тока нагрузки те же, что и при активном его характере).

Таким образом, при отклонении параметров ( $\omega$ ,  $L$ ,  $C$ ) схемы ПИТ от значений тех же параметров ( $\omega_0$ ,  $L_0$ ,  $C_0$ ) в режиме постоянства выходного тока характер зависимости  $\delta = f(\varphi_H)$  может стать либо нисходящим, либо восходящим. В подтверждение этого на рис. 4 приведены кривые зависимости  $\delta = f(\varphi_H)$ , построенные по выражению (6) при  $n_H = 1$  для случая, когда режим постоянства выходного тока ПИТ нарушается из-за отклонения значения  $L$  от  $L_0$ . По кривым рис. 4 находим, что при активно-индуктивной нагрузке  $\varphi_{H.K} = 8^\circ$ , а при активно-емкостной —  $\varphi_{H.K} = 14^\circ$ . На основе (6) при известном значении  $n_H$  можно построить аналогичные кривые при отклонении значения одного из коэффициентов ( $k_L$ ,  $k_C$ ,  $k_{\omega}$ ) от единицы и на их основе определить стабилизирующие свойства каждого варианта [7] трехлучевой схемы ПИТ (рис. 5). Эти варианты приведены в табл. 1, где  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  — произвольная система э. д. с.

Проведем сравнительный анализ стабилизирующих свойств трехлучевых схем ПИТ для наиболее распространенного случая, когда нагрузка носит активный характер и в схемах отсутствует дополнительный элемент.

Выражения для реактивной мощности преобразующих элементов, а также номинальной мощности нагрузки в трехлучевых схемах ПИТ в режиме постоянства

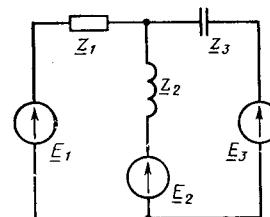


Рис. 5. Трехлучевая схема ПИТ

выходного тока могут быть представлены в обобщенном виде [9]:

$$Q_L = \frac{E_{23}^2}{\omega_0 L_0} (B^2 + n^2 - 2Bn \sin \theta); \quad (7)$$

$$Q_C = \frac{E_{23}^2}{\omega_0 L_0} (1 + B^2 + 2B \cos \theta + n^2 - 2Bn \sin \theta); \quad (8)$$

$$P_H = \frac{E_{23}^2}{\omega_0 L_0} n_H, \quad (9)$$

где  $n = R_H / \omega_0 L_0$ ;  $B = E_{12} / E_{23}$ ;  $E_{12} = |E_1 - E_2|$ ;

$E_{23} = |E_2 - E_3|$ ;

$\theta$  — угол между векторами  $E_{12} = E_1 - E_2$  и  $E_{23} = E_2 - E_3$ .

Предположим, что оценка оптимальности схемы ПИТ ведется по значению суммарной удельной мощности  $q$  преобразующих элементов. Из равенств (7) — (9) для рассматриваемых схем следует:

$$q = \frac{Q_L + Q_C}{P_H} = \frac{1 + 2(B^2 + B \cos \theta)}{n_H} + 2\lambda_a^2 n_H - 4B\lambda_a \sin \theta. \quad (10)$$

Как видно, единственным параметром, изменением которого можно минимизировать суммарную удельную мощность преобразующих элементов, является номинальное значение относительной нагрузки.

Используя методику оптимального проектирования ПИТ [8], на основе (10) заключаем, что  $n_H$  однозначно определяется критическим значением относительной нагрузки  $n_{kp}$ , диапазон изменения которой можно разделить на три области:

в первой области  $-\infty \leq n_{kp} \leq n_{p.v}$  и в качестве расчетного следует принимать

$$n_H = n_{p.v} = \sqrt{\frac{1 + 2(B^2 + B \cos \theta)}{2}}, \quad (11)$$

во второй области  $n_{p.v} < n_{kp} \leq n_{p.h}$  и в качестве расчетного следует принимать

$$n_H = n_{kp} = \frac{2B \sin \theta}{1 + \lambda_a}; \quad (12)$$

Таблица 1

| Вариант ПИТ | Э. д. с. в ветвях с сопротивлением |             |             |
|-------------|------------------------------------|-------------|-------------|
|             | $Z_1$                              | $Z_2$       | $Z_3$       |
| 1-й         | $E_1$                              | $E_2$       | $E_3$       |
| 2-й         | 0                                  | $\bar{E}_2$ | $\bar{E}_3$ |
| 3-й         | $E_1$                              | $\bar{E}_2$ | 0           |
| 4-й         | $\bar{E}_1$                        | 0           | $E_3$       |
| 5-й         | 0                                  | $E_2$       | 0           |
| 6-й         | 0                                  | 0           | $E_3$       |

Таблица 2

| Вариант ПИТ | B            | $\theta$ , град | Значение $n_H$ при $\lambda_a$ |      |      |      |      |      |
|-------------|--------------|-----------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|
|             |              |                 | 0                              | 0,2  | 0,4  | 0,6  | 0,8  | 1,0  |
| 1-й         | 1            | 120             | 1,73                           | 1,44 | 1,24 | 1,08 | 1,0  | 1,0  |
| 2-й         | $1/\sqrt{3}$ | 150             | 0,58                           | 0,58 | 0,58 | 0,58 | 0,58 | 0,58 |
| 3-й         | $\sqrt{3}$   | 150             | 1,73                           | 1,44 | 1,41 | 1,41 | 1,41 | 1,41 |
| 4-й         | 1            | 60              | 1,73                           | 1,44 | 1,41 | 1,41 | 1,41 | 1,41 |
| 5-й         | 1            | 180             | 0,71                           | 0,71 | 0,71 | 0,71 | 0,71 | 0,71 |
| 6-й         | 0            | —               | 0,71                           | 0,71 | 0,71 | 0,71 | 0,71 | 0,71 |

в третьей области  $n_{p.H} < n_{k.p} \leq \infty$  и в качестве расчетного принимается

$$n_H = n_{p.H} = \frac{1}{\lambda_a} \sqrt{\frac{1 + 2(B^2 + B \cos \theta)}{2}}. \quad (13)$$

При дальнейшем исследовании вопроса будем считать, что питание схемы ПИТ осуществляется от трехфазной сети. В данном случае расчетные параметры для каждого варианта схемы ПИТ при допущении, что  $E_1 = E$ ,  $E_2 = E \exp(j240^\circ)$ ;  $E_3 = E \exp(j120^\circ)$ , приведены в табл. 2.

Предположим дальше, что базовому значению соответствует номинальное значение сопротивления нагрузки. Тогда  $\lambda_{a.6} = \lambda_{p.6} = 1$  и при активном характере сопротивления нагрузки на основе (5) для модуля относительного тока нагрузки получим:

$$\delta = \sqrt{\frac{(n_H k_C + k_\omega k_L Q_0)^2 + (1 - n_H Q_0 (k_\omega^2 k_L k_C - 1))^2}{(\lambda_a n_H k_C + k_\omega k_L Q_0)^2 + [1 - \lambda_a n_H Q_0 (k_\omega^2 k_L k_C - 1)]^2}}. \quad (14)$$

На основании (14) по данным табл. 2 можно определить  $\delta$  для каждого варианта схемы ПИТ; с этой целью рассмотрим, каким образом и в какой степени отклонение параметра  $Q = Q_0$  от бесконечно большого значения оказывается на степень стабильности выходного тока ПИТ. В данном случае в (14) следует положить  $k_L = k_C = k_\omega = 1$ ; тогда выражение

$$\delta(Q) = \sqrt{\frac{1 + (n_H + \delta)^2}{1 + (\lambda_a n_H + Q)^2}} \quad (15)$$

позволяет судить о стабильности выходного тока ПИТ при  $Q = \text{const}$ .

Как следует из (15) при прочих равных условиях и снижении значения коэффициента вариации сопротивления нагрузки ниже единицы (что имеет место в реальных условиях) наибольшее значение  $\delta(Q)$  принимает в режиме короткого замыкания сопротивления нагрузки. Поэтому значение  $\delta(Q)$ , получаемое подстанов-

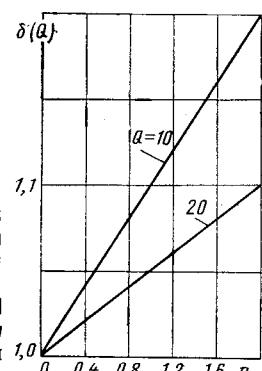


Рис. 6. Графики зависимостей изменения относительной величины выходного тока ПИТ в зависимости от добротности дросселя и номинальной величины относительной нагрузки.

кой в (15)  $\lambda_a = 0$ , полностью характеризует стабилизирующие свойства схем ПИТ. Наглядно оценить это свойство можно с помощью графиков, представленных на рис. 6, из которых следует, что наименьшим отклонением выходного тока обладает второй вариант схемы ПИТ. На основе анализа рис. 6 заключаем также, что в каждом варианте схемы ПИТ отклонение выходного тока тем меньше, чем больше добротность дросселя.

В тех случаях, когда в качестве базового принимается режим короткого замыкания сопротивления нагрузки для определения относительной величины выходного тока в выражении (5) следует принимать  $\lambda_{a.6} = \lambda_{p.6} = 0$ . Получаемая таким путем формула для определения  $\delta(Q)$  полностью согласуется с формулой (9), приведенной в [4].

Предположим теперь, что  $Q_0 = \infty$ , тогда на основе (14) получим

$$\delta = \sqrt{\frac{k_\omega^2 k_L^2 + n_H^2 (1 - k_\omega^2 k_L k_C)^2}{k_\omega^2 k_L^2 + \lambda_a^2 n_H^2 (1 - k_\omega^2 k_L k_C)^2}}. \quad (16)$$

Результаты расчетов по формуле (16) при отклонении значения одного из коэффициентов ( $k_L$ ,  $k_C$ ,  $k_\omega$ ) от единицы приведены в табл. 3, где  $\delta(k_L) = \delta$  при  $k_\omega = k_C = 1$ ;  $\delta(k_C) = \delta$  при  $k_\omega = k_L = 1$ ;  $\delta(k_\omega) = \delta$  при  $k_L = k_C = 1$ .

Данные табл. 3 показывают, что стабилизирующие свойства схемы ПИТ мало зависят от колебаний частоты источника э. д. с. Так, при изменении частоты на  $\pm 10\%$  во втором варианте схемы ПИТ происходит отклонение тока нагрузки не более, чем на 1 %, в первом варианте — не более, чем на 6,5 % и т. д. Кроме того, в каждом варианте схемы ПИТ при  $\omega > \omega_0$  отклонение выходного тока меньше, чем при  $\omega < \omega_0$ . Такой же результат получается в каждом варианте схемы ПИТ при отклонении параметра  $L$  от  $L_0$ . Поэтому можно заключить, что при  $\omega = \text{const}$  и при всех практических значениях настройки преобразующих элементов схемы ПИТ при одинаковых отклонениях следует отдавать предпочтение варианту с высоким индуктивным сопротивлением.

Данные табл. 3 показывают также, что кривая зависимости  $\delta = f(k_C)$  симметрична относительно точки  $k_C = 1$ . Из сопоставления данных табл. 3 очевидно, что при одинаковых отклонениях параметров  $\omega$ ,  $L$  и  $C$  соответственно от  $\omega_0$ ,  $L_0$  и  $C_0$  трехлучевые схемы ПИТ более критичны к отклонению частоты действующих в схеме источников э. д. с. Это объясняется тем, что разбаланс между сопротивлениями преобразующих элементов схемы ПИТ при отклонении  $\omega$  от  $\omega_0$  более ощутим, чем при отклонении  $L(C)$  от  $L_0(C_0)$ .

Из приведенного сравнительного анализа вариантов следует, что по стабилизирующим свойствам лучшим является второй вариант схемы ПИТ. Это обусловлено тем, что этот вариант схемы ПИТ по сравнению с другим имеет меньшее значение номинальной относительной нагрузки. Аналогично можно сравнить варианты ПИТ при любых значениях параметров  $B$  и  $\theta$ .

Очевидно, что выводы, сделанные выше, справедливы и в том случае, когда стабилизирующие свойства схемы ПИТ оцениваются при конечном значении добротности дросселя ( $Q_0 < \infty$ ) и при отклонении одного из параметров ( $L$ ,  $C$ ,  $\omega$ ) от его значения ( $L_0$ ,  $C_0$ ,  $\omega_0$ ) в режиме постоянства потребляемого тока. Ясно, что в подобных случаях значение  $\delta$  будет большим, чем его значение при  $Q_0 = \infty$ . Для подтверждения этого в табл. 4 приведены результаты расчета по (14) для первого варианта схемы ПИТ. При фиксированных значениях  $Q_0 < \infty$  аналогич-

Таблица 3

| Вариант       | $\delta(k_L)$ | $\delta(k_C)$ | $\delta(k_\infty)$ | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|               | $k = 0,8$     |               |                    | $k = 0,9$     |               |                    | $k = 1,0$     |               |                    | $k = 1,1$     |               |                    | $k = 1,2$     |               |                    |
| 1-й, 3-й, 4-й | 1,089         | 1,058         | 1,26               | 1,018         | 1,015         | 1,065              | 1,0           | 1,0           | 1,0                | 1,012         | 1,015         | 1,05               | 1,041         | 1,058         | 1,18               |
| 2-й           | 1,011         | 1,007         | 1,03               | 1,002         | 1,0016        | 1,01               | 1,0           | 1,0           | 1,0                | 1,0014        | 1,0016        | 1,006              | 1,005         | 1,007         | 1,02               |
| 5-й, 6-й      | 1,016         | 1,01          | 1,05               | 1,003         | 1,002         | 1,011              | 1,0           | 1,0           | 1,0                | 1,002         | 1,002         | 1,01               | 1,007         | 1,01          | 1,03               |

П р и м е ч а н и е. Значения коэффициентов приведены при  $\lambda_a = 0$

Таблица 4

| k   | $\delta(k)$ для первого варианта схемы ПИТ<br>при $\lambda_a = 0$ и $Q_0 = 20$ |               |                    |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------|
|     | $\delta(k_L)$                                                                  | $\delta(k_C)$ | $\delta(k_\infty)$ |
| 0,8 | 1,21                                                                           | 1,14          | 1,39               |
| 0,9 | 1,12                                                                           | 1,10          | 1,17               |
| 1,0 | 1,086                                                                          | 1,086         | 1,086              |
| 1,1 | 1,083                                                                          | 1,10          | 1,14               |
| 1,2 | 1,099                                                                          | 1,14          | 1,22               |

но можно определить  $\delta$  по (14) для каждого варианта схемы ПИТ.

Таким образом, рекомендуемая методика определения относительной величины тока нагрузки позволяет оценивать стабилизирующие свойства схемы ПИТ любой структуры и производить оптимальный выбор той или иной схемы при разработке источников питания с неизменным выходным током.

#### Список литературы

1. Милях А. Н., Кубышин Б. Е., Волков И. В. Индуктивно-емкостные преобразователи.— Киев: Наукова думка, 1964.

2. Гуттерман К. Д. Разработка и исследование параметрических источников тока. Тр. МЭИ, 1972, вып. 159.

3. Прозорова Н. Д. Нагрузочная характеристика неуправляемого параметрического источника тока. Тезисы докладов научно-технической конференции МЭИ, 1966—1967.

4. Губаревич В. Н., Исаков В. Н., Кабан В. П. Двухэлементные схемы индуктивно-емкостных преобразователей.— В кн.: Источники электропитания со специальными характеристиками.— Киев: Наукова думка, 1979.

5. Закревский С. И., Басанко Ю. В. Влияние отклонений параметров на работу индуктивно-емкостного преобразователя в режиме постоянства потребляемого тока.— В кн.: Источники электропитания со специальными характеристиками.— Киев: Наукова думка, 1979.

6. Вадачкория Г. В. Оптимальная система э. д. с. в схемах параметрических источников тока.— Сообщения АН ГССР, вып. 95, № 1, 1979.

7. Котия А. К., Вадачкория Г. В. К вопросу синтезирования схем параметрических источников тока.— Сообщения АН ГССР, вып. 75, № 2, 1974.

8. Ашинянц С. А., Гуттерман К. Д. Методика оптимального проектирования неуправляемых однофазных и трехфазных симметрических параметрических источников тока. Тезисы докладов научно-технической конференции. Проблемы преобразовательной техники, т. V, Киев: ИЭД АН УССР, 1979.

9. Вадачкория Г. В. Номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора, использованного в схеме параметрических источников тока. Сообщения АН ГССР, вып. 91, № 3, 1978.

[13.08.81]

УДК 621.372.001.24

## Матричное преобразование уравнений состояния и эквивалентные схемы линейных цепей

МЕЛЕШКИН В. Н.

Современное состояние теоретической электротехники и электроники характеризуется интенсивным развитием и широким использованием в инженерной практике машинных методов анализа цепей и сетей [1 и 2]. Эффективность таких методов принято оценивать по требуемым для их реализации на ЭВМ объему оперативной памяти и затратам машинного времени [3]. Поэтому разработка эффективных алгоритмов и программ анализа представляет собой достаточно сложную проблему, для решения которой необходимы специальная математическая подготовка и определенные практические навыки. Однако по мере совершенствования вычислительных средств и методов технические показатели ЭВМ перестают быть определяющими при решении все более широкого круга инженерных задач. В таких условиях перво-

степенное значение приобретают затраты времени на составление и отладку программ расчета, простота и удобство обращения с ЭВМ в процессе подготовки и решения задач.

Об этом свидетельствует и появление достаточных простых алгоритмических языков типа БЭЙСИК, который предназначен для программирования задач как в пакетном, так и в диалоговом режиме и широко используется в системах с разделением времени [4]. Наличие в составе таких языков разнообразных операций над матрицами возрождает практический интерес к традиционным матричным методам анализа цепей [5—7], получившим развитие в 50—60-е годы, но впоследствии уступившим место более эффективным (в упомянутом выше смысле) табличным и списочным методам [2 и 8].

В настоящей статье предпринята попытка систематизировать матричные способы описания наиболее распространенных видов структурных преобразований в электрических цепях и тем самым содействовать расширению сферы применения ЭВМ в инженерной практике.

Ограничимся рассмотрением линейных электрических цепей, содержащих наряду с автономными источниками и потребителями управляемые (зависимые) источники и накопители энергии. Допустим также, что названные элементы могут быть объединены в ветви одним из двух способов (последовательно или параллельно). Тогда заданному множеству ветвей соответствуют следующие матричные уравнения:

$$U_0 = Z_0 I_0 - E_0 \text{ или } I_0 = Y_0 U_0 + J_0, \quad (1)$$

где  $U_0$  и  $I_0$  обозначают векторы напряжений и токов ветвей, векторы  $E_0$  и  $J_0 = Z_0^{-1}E_0$  представляют автономные источники энергии, а квадратные матрицы  $Z_0$  и  $Y_0 = Z_0^{-1}$  описывают потребители, накопители и управляемые источники в ветвях.

Уравнения электрической цепи, составленной из этих ветвей в виде многополюсника, также можно записать в двух взаимно обратных формах:

$$U = ZI - E \text{ или } I = YU + J, \quad (2)$$

где  $U$  и  $I$  — векторы внешних напряжений и токов многополюсника;  $Z$  и  $Y = Z^{-1}$  — его параметрические матрицы, а  $E$  и  $J = Z^{-1}E$  — векторы источников э. д. с. и тока, учитывающие результат влияния внутренних автономных источников энергии на внешние напряжения и токи.

Процедура образования многополюсника соответствует линейному преобразованию векторов вида

$$I_0 = AI \text{ или } U_0 = BU, \quad (3)$$

где  $A$  и  $B$  — прямоугольные матрицы связи, элементами которых обычно служат 0 и  $\pm 1$ .

В дополнение к условию (3) полагают, что общий энергетический баланс цепи при этом не изменяется [1, 5—7]:

$$I_0^t U_0 = I^t U \text{ или } U_0^t I_0 = U^t I, \quad (4)$$

где  $t$  означает транспонирование матрицы.

Соотношения (3) и (4) представляют собой необходимые и достаточные условия преобразования исходного множества ветвей (1) в многополюсник (2), параметры которого определяются следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} U = A^t U_0; \\ Z = A^t Z_0 A; \\ E = A^t E_0, \end{array} \right. \quad \left. \begin{array}{l} I = B^t I_0; \\ Y = B^t Y_0 B; \\ J = B^t J_0. \end{array} \right\} \quad (5)$$

Приведенный результат широко используется в тех случаях, когда составление матриц связи  $A$  или  $B$  не вызывает затруднений. Примерами здесь могут служить преобразования, лежащие в основе методов контурных токов и узловых напряжений или потенциалов, где в ка-

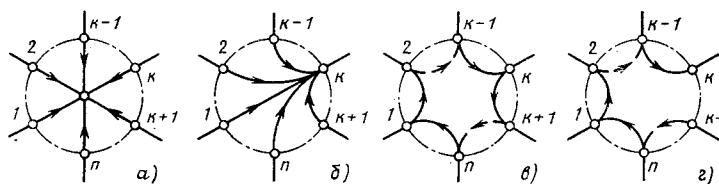


Рис. 1. Соединение ветвей звездой (a, б) и угольником (в, г): исходные (a, в) и эквивалентные (б, г) многополюсники

честве матриц связи используются структурные (топологические) матрицы контуров, сечений или инциденций [5, 7, 9]. Следует, однако, заметить, что в результате этих преобразований исходная цепь превращается в многополюсник, все внешние узлы (полюсы) которого либо обесточены ( $I=0$ ), либо замкнуты накоротко ( $U=0$ ) [7].

Покажем, что изложенный выше подход в действительности является более общим и позволяет описать практически все существующие способы соединения ветвей и виды преобразования линейных (или линеаризованных) электрических цепей. Это утверждение основывается на том, что любая сколь угодно сложная процедура преобразования может быть представлена последовательностью элементарных операций. Разумеется, объем вычислений при этом возрастает, однако такое расчленение процесса преобразования существенно облегчает составление матриц связи на отдельных этапах. Более того, разнообразие элементарных операций оказывается столь невелико, что для большинства из них можно указать простые правила формирования матриц связи.

**Соединения двухполюсников.** Заданное множество ветвей, описываемое уравнениями (1), может быть объединено в электрическую цепь путем последовательного или параллельного соединения, а также в результате соединения по схеме звезды или многоугольника и, наконец, произвольной комбинацией перечисленных способов. Преобразованная цепь может оказаться двухполюсником либо в общем случае многополюсником, для которых справедливы уравнения (2).

При последовательном соединении  $n$  одинаковым образом ориентированных ветвей ток в каждой из них является одновременно током  $I$  эквивалентного двухполюсника:

$$I_0 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \dots & n \end{bmatrix}^t I.$$

Сопоставляя это выражение с соотношениями (3), находим, что рассматриваемое соединение описывается матрицей  $A$  в виде столбца с  $n$  единицами. Образование эквивалентного двухполюсника в данном случае можно представить как объединение исходного множества ветвей, осуществляющее исключением всех  $(n-1)$  внутренних узлов в их последовательном соединении [7]. Очевидно, что матрица  $B$ , сформированная в виде столбца с  $n$  единицами, соответствует параллельному соединению  $n$  ветвей, которое преобразуется в эквивалентный двухполюсник путем исключения всех  $(n-1)$  внутренних контуров.

Если же цепь представляет собой смешанное соединение ветвей относительно какой-либо пары узлов, принятых за внешние, то процедуру преобразования ее в эквивалентный двухполюсник целесообразно разложить на рассмотренные выше элементарные операции (см. пример 1).

Перейдем к анализу способов образования многополюсников. Пусть исходное множество ветвей, описываемое матричными уравнениями (1), соединено звездой так, что все ветви одинаковым образом ориентированы относительно ее внутреннего узла (рис. 1, а). В таком случае ток одной из ветвей, например  $k$ -й, на основании первого закона Кирхгофа определяется линейной комбинацией остальных  $(n-1)$  токов, которые по этой причине составляют вектор  $I$  независимых токов звезды:

$$i_k = [-1 \dots -1 \quad 1 \dots 1] I.$$

Следовательно, матрица  $A$ , отражающая связь (3) между токами  $I_0$  и  $I$ , может быть сформирована из диагональной матрицы размера  $n \times n$  вычеркиванием  $k$ -го столбца и заменой всех элементов  $k$ -й строки на  $-1$ :

$$\begin{array}{c|ccccc} 1 & k-1 & k+1 & n \\ \hline 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 & k-1 \\ \hline -1 & \dots & -1 & -1 & \dots & -1 & k \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 & k+1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 & n \end{array} \quad (6)$$

Нетрудно убедиться в том, что такая матрица  $A$  отражает преобразование исходной звезды в эквивалентную ей звезду без внутреннего узла (рис. 1, б). Действительно, в матричных уравнениях

$$U_\lambda = Z_\lambda I - E_\lambda \text{ или } I = Y_\lambda U_\lambda + J_\lambda, \quad (7)$$

описывающих этот новый многополюсник, вектор  $I$  содержит независимые токи  $(n-1)$  внешних узлов (кроме  $k$ -го), а вектор  $U_\lambda$  составлен из потенциалов тех же узлов относительно базисного  $k$ -го узла (5), т. е. представляет напряжения на ветвях новой  $n$ -звезды. Рассматриваемое преобразование можно истолковать и как результат объединения внутреннего узла в исходной звезде с ее внешним  $k$ -м узлом, осуществляя переносом  $k$ -й ветви через этот внутренний узел в остальные  $(n-1)$  ветви [10].

Следуя принципу дуальности, можно утверждать, что аналогичная (6) матрица  $B$  отражает преобразование замкнутого  $n$ -угольника (рис. 1, в) в эквивалентный ему разомкнутый  $n$ -угольник (рис. 1, г), описываемый уравнениями:

$$U = Z_\Delta I_\Delta - E_\Delta \text{ или } I_\Delta = Y_\Delta U + J_\Delta. \quad (8)$$

Здесь вектор  $U$  представляет независимые напряжения  $(n-1)$  смежных пар внешних узлов (кроме  $k$ -й пары), а вектор  $I_\Delta$  составлен из разностей соответствующих им внешних контурных токов и тока в  $k$ -м внешнем контуре (5), т. е. содержит токи ветвей нового  $n$ -угольника. Иначе говоря, такое преобразование соответствует объединению внутреннего контура в исходном  $n$ -угольнике с его внешним базисным  $k$ -м контуром, достигаемому за счет переноса  $k$ -й ветви вдоль этого внутреннего контура в остальные  $(n-1)$  ветви [10].

Если же исходное множество ветвей образует цепь, содержащую наряду с внешними узлами и контурами более одного внутреннего узла и (или) более чем один внутренний контур, то процесс преобразования ее к эквивалентному многополюснику вида звезда или угольник следует разложить на элементарные операции (см. пример 2).

**Преобразования многополюсников.** В процессе объединения многополюсников в сложную электрическую цепь возникает потребность преобразования соответствующих им уравнений к наиболее удобному для этого виду. Перечень таких операций обычно включает замену порядка перечисления ветвей или узлов многополюсника, изменение положительных направлений тока и напряжения в отдельных его ветвях, взаимные преобразования вида звезда и угольник и т. д. Корректировка уравнений многополюсника неизбежна при замене базисного узла или контура, а также в результате корот-

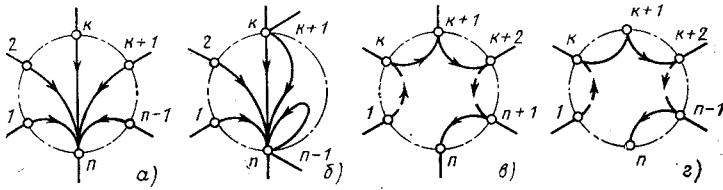


Рис. 2. Объединение внешних узлов (а, б) и контуров (с, д) исходные (а, с) и преобразованные (б, д) многополюсники

ких замыканий или обрывов внешних соединительных проводов и т. п. Указанные операции в большинстве своем достаточно хорошо изучены, главным образом на примере пассивных многополюсников [1, 6—7], однако отсутствие единства в описании этих операций делает целесообразным их рассмотрение в данной статье.

Простейшими среди названных преобразований являются, по-видимому, перенумерация и переориентация ветвей. Применимельно к  $n$ -полюснику (см. рис. 1, а или 1, г) матрицы связи  $A=B$  для таких операций формируются на основе диагональной единичной матрицы размера  $(n-1) \times (n-1)$ , изменение знака у элемента которой соответствует переориентации ветвей, а перестановка ее столбцов (или строк) означает изменение порядка перечисления ветвей.

Зачастую возникает необходимость заменить в многополюснике базисный узел или контур. Пусть задан  $n$ -звезда с  $k$ -м базисным узлом (см. рис. 1, б). Определим матрицу связи, преобразующую ее к  $n$ -звезды с  $l$ -м базисным узлом. Учитывая, что оба эти многополюсники являются производными от  $n$ -звезды с внутренним узлом (см. рис. 1, а), составим из напряжений ее ветви следующие два вектора:

$$U'_0 = [(u_1 - u_k) \dots 0 \dots (u_l - u_k) \dots (u_n - u_k)]$$

$$U''_0 = [(u_1 - u_l) \dots (u_k - u_l) \dots 0 \dots (u_n - u_l)]$$

Как видно, векторы  $U'_0$  и  $U''_0$  имеют по одному нулевому элементу, который отличает их от векторов  $U$  и  $U''_0$  заданной и преобразованной  $n$ -звезд без внутренних узлов. Сравнивая их, заключаем, что искомая матрица связи  $B$  может быть сформирована из диагональной единичной матрицы размера  $n \times n$  вычеркиванием  $k$ -строки и  $l$ -го столбца и заменой всех элементов  $k$ -го столбца на  $-1$ .

В частном случае при  $l=n$ , что соответствует преобразованию заданной звезды (см. рис. 1, б) в  $n$ -звезду с  $n$ -м базисным узлом (рис. 2, а), матрица связи  $B$  имеет вид [1, 6—7]:

$$\begin{array}{c|ccccc} 1 & k-1 & k & k+1 & n-1 \\ \hline 1 & \dots & 0 & -1 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & k-1 \\ \hline 0 & \dots & 0 & -1 & 1 & \dots & 0 & k+1 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & -1 & 0 & \dots & 1 & n-1 \\ 0 & \dots & 0 & -1 & 0 & \dots & 0 & n \end{array}$$

Нетрудно убедиться в том, что матрица  $A$  вида (1) преобразует  $n$ -угольник с  $k$ -м базисным контуром (см. рис. 1, г) в  $n$ -угольник с  $n$ -м базисным контуром (см. рис. 2, б).

Короткие замыкания и обрывы соединительных проводов сокращают число внешних узлов многополюсника. Последствия замыканий рассмотрим на примере  $n$ -звезды, объединение  $k$ -го и  $l$ -го узла в которой равносильно уравниванию их потенциалов относительно базисного узла. Поэтому матрица связи  $B$  между узловыми потенциалами исходной ( $U_\Delta'$ ) и преобразованной ( $U_\Delta''$ )  $n$ -звезд может быть получена из диагональной единичной матрицы размера  $(n-1) \times (n-1)$  вычеркиванием  $l$ -го столбца и переносом его содержимого в  $k$ -й столбец (если этот последний не соответствует базисному узлу).

В частности, преобразование  $n$ -звезды в  $(n-2)$ -звезду (см. рис. 2, а и б) описывается матрицей связи  $B$  вида [6]:

$$\begin{array}{ccccc} 1 & k & k+2 & n-2 \\ \hline 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ & \dots & & \dots & \dots & \\ 0 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 \\ & \dots & & \dots & \dots & \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \end{array} \quad (10)$$

Естественно предположить, что матрица  $A$  вида (10) преобразует  $n$ -угольник в  $(n-2)$ -угольник (см. рис. 2, в и г), получающийся из исходного при обрыве  $(k+1)$ -го и  $n$ -го соединительных проводов.

Наибольшее распространение в расчетной практике получили, по-видимому, взаимные преобразования многополюсников вида звезда и угольник. Как известно, многократное использование этого приема позволяет существенно упростить схему цепи за счет последовательного исключения узлов или контуров в ней [7, 9]. При этом обычно предполагают, что преобразуемые многополюсники имеют внутренние узел или контур (см. рис. 1, а и в), а потому каждое такое преобразование, в отличие от рассмотренных выше, сводится по сути к замене внутреннего узла внутренним контуром и наоборот.

При отсутствии внутренних узлов и контуров взаимные преобразования многополюсников не приводят к упрощению схемы, однако их использование позволяет вычислять внешние напряжения и токи через заданные узловые потенциалы или контурные токи (7)–(8).

Определим матрицу связи, отражающую преобразование  $n$ -звезды с  $k$ -м базисным узлом в эквивалентный ей  $n$ -угольник с  $k$ -м базисным контуром (см. рис. 1, б и г). Из сопоставления | многополюсников видно, что независимые токи  $n$ -звезды, как правило, соответствуют разностям токов в смежных ветвях  $n$ -угольника. Исключение составляет лишь ток  $(k+1)$ -го узла, который однозначно определяется током  $(k+1)$ -й ветви в  $n$ -угольнике. Поэтому матрица связи  $A$ , соответствующая данному преобразованию, может быть получена из диагональной единичной матрицы размера  $(n-1) \times (n-1)$  добавлением по одному элементу — 1 во все ее строки кроме  $(k+1)$ -й. Упомянутые элементы располагаются в строках соответственно порядковым номерам смежных ветвей  $n$ -угольника, т. е. обычно слева от главной диагонали и только в первой строке элемент — 1 занимает крайнее правое положение, ибо в первом узле  $n$ -угольника смежными являются первая и  $n$ -я ветви.

В частном случае, когда базисным в  $n$ -звезде служит ее последний узел (см. рис. 2, а), матрица  $A$ , преобразующая эту звезду в эквивалентный  $n$ -угольник (см. рис. 2, в)

имеет вид [6–7]:

$$\left[ \begin{array}{cccccc|c} 1 & 2 & 3 & \dots & n-2 & n-1 & \\ \hline 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 2 \\ 0 & -1 & 1 & \dots & 0 & 0 & 3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & n-2 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 1 & n-1 \end{array} \right] \quad (11)$$

Особенность рассматриваемого преобразования состоит в том, что матрица  $A^t$  в соответствии с (5) определяет соотношение между вектором  $U$  внешних напряжений  $n$ -угольника и вектором  $U_\Delta$  узловых потенциалов  $n$ -звезды. Таким образом, если матрица  $A$ , сформированная по указанному выше правилу, преобразует первое из уравнений (7) в первое из уравнений (8), то матрица  $B = A^t$  осуществляет переход от второго из уравнений (8) ко второму из уравнений (7).

Так как матрица  $A$ , преобразующая  $n$ -звезду с  $k$ -м базисным узлом в эквивалентный  $n$ -угольник, неособенная, то обратная ей матрица, имеющая вид

$$\left[ \begin{array}{ccccc|c} 1 & 2 & k-1 & k+1 & n-1 & n \\ \hline 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 0 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 \\ \dots & \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & k-1 \\ \dots & \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & k+1 \\ \dots & \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & n-1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & n \end{array} \right], \quad (12)$$

описывает обратное преобразование  $n$ -угольника с  $k$ -м базисным контуром в эквивалентную  $n$ -звезду, т. е. преобразует первое из уравнений (8) в первое из уравнений (7). Естественно, что матрица  $B$ , полученная транспонированием (12), осуществляет переход от второго из уравнений (7) ко второму из уравнений (8).

Уравнения (7) и (8) примечательны тем, что им можно поставить в соответствие вполне определенные схемы замещения (см. рис. 1, б и г). Однако каждое из них содержит лишь один из векторов, обозначающих внешние токи ( $I$ ) или напряжения ( $U$ ) многополюсника. Поэтому представляется полезным установить связь непосредственно между векторами  $I$  и  $U$ , т. е. описать многополюсник уравнениями вида (2).

Такую возможность дает матрица связи  $A$ , преобразующая  $n$ -звезду в эквивалентный ей  $n$ -угольник. Действительно, умножив обе части второго из уравнений (8) на матрицу  $A$  слева и сопоставив результат с соответствующим уравнением (2), находим:

$$Y = AY_\Delta, \quad J = AJ_\Delta.$$

Если же первое из уравнений (7) умножить подобным образом на матрицу  $A^t$  и сравнить итог с первым из уравнений (2), то получается:

$$Z = A^t Z_\Delta, \quad E = A^t E_\Delta.$$

Завершая анализ наиболее распространенных преобразований многополюсников, укажем на допустимость совмещения отдельных элементарных операций. Очевидно, что совместимы являются такие процедуры, которым соответствуют однородные матрицы связи, т. е. матрицы, преобразующие либо токи ( $A$ ), либо напряжения ( $B$ ). Например, замена базисного контура (узла) в

*n*-угольнике (*n*-звезды) может быть выполнена одновременно с объединением внешних контуров (узлов) и преобразованием в эквивалентную звезду (угольник) и т. п. Матрицы связи в подобных случаях можно определить либо перемножением соответствующих элементарных матриц, либо сформировать непосредственным сопоставлением исходной и преобразованной схем многополюсника.

Итак, все перечисленные выше способы объединения элементов в электрическую цепь и виды преобразования многополюсников действительно описываются матричными операциями только трех типов (умножение, транспонирование и обращение). Реализация их на ЭВМ при современном программном обеспечении не составляет большого труда и доступна инженеру-электрику практически без какой-либо специальной подготовки в области программирования.

В порядке иллюстрации описанных способов преобразования цепей рассмотрим следующие две задачи.

**Пример 1.** Определим общую индуктивность цепи, составленной из шести индуктивно связанных катушек, которые соединены параллельно-последовательно (рис. 3, а). Задача сводится к преобразованию исходной цепи в эквивалентный индуктивный двухполюсник, и ее решение имеет вид:

$$L = A^t (B^t L_0^{-1} B)^{-1} A. \quad (13)$$

где  $L_0$  — матрица собственных и взаимных индуктивностей катушек;  $B$  — матрица связи, объединяющая параллельно соединенные катушки в эквивалентные ветви, а  $A$  — матрица, объединяющая указанные ветви в эквивалентный двухполюсник, причем

$$B^t = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Пусть

$$L_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0,7 & 0,5 & 0,3 & 0,2 & 0,1 \\ 0,7 & 1 & 0,7 & 0,5 & 0,3 & 0,2 \\ 0,5 & 0,7 & 1 & 0,7 & 0,5 & 0,3 \\ 0,3 & 0,5 & 0,7 & 1 & 0,7 & 0,5 \\ 0,2 & 0,3 & 0,5 & 0,7 & 1 & 0,7 \\ 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0,5 & 0,7 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

тогда в результате расчета по формуле (13) получаем  $L = 4,65$ .

**Пример 2.** Определим параметры двухобмоточного трансформатора, эквивалентного электрической цепи, которая содержит шесть индуктивно связанных катушек, соединенных параллельно звездой и угольником (см. рис. 3, б). Эта задача сводится к представлению исходной цепи эквивалентным трехполюсником (см. рис. 3, в) и имеет решение, аналогичное предыдущему (13) при условии, что теперь матрица связи  $B$  исключает в исходной цепи три внутренних контура (переносом ветвей 2, 5 и 6 в ветви 1, 3 и 4), а матрица  $A$  исключает в образовавшейся звезде внутренний узел (переносом ветви 4

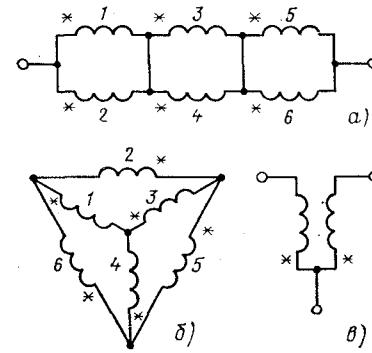


Рис. 3. Схемы соединения индуктивно связанных катушек

в ветви 1 и 3) и изменяет ориентацию ветви 1:

$$B^t = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Приняв параметры катушек равными (14) и выполнив расчеты для приведенных значений  $A$  и  $B$ , находим:

$$L = \begin{bmatrix} 0,162 & 0,066 \\ 0,066 & 0,109 \end{bmatrix}.$$

**Выводы.** 1. Практически все известные способы и приемы преобразования схем электрических цепей могут быть описаны единым матричным преобразованием соответствующих им уравнений состояния.

2. Указанное преобразование уравнений представляет собой последовательность элементарных операций типа умножение, транспонирование и обращение матриц, выполнение которых на ЭВМ значительно облегчается существованием соответствующих матричных операторов в современных алгоритмических языках.

3. Матричное преобразование уравнений состояния наиболее эффективно при наличии взаимных и невзаимных связей между ее элементами, существенно затрудняющих использование традиционных методов преобразования схем.

#### Список литературы

1. Жуков Л. А., Стратан И. П. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем. Методы расчетов.— М.: Энергия, 1979.
2. Чуа Л. О., Лин Пен-Мин. Машинный анализ электронных схем. Алгоритмы и вычислительные методы.— М.: Энергия, 1980.
3. Бармаков Ю. Н. и др. Результаты исследования ряда программ анализа электронных схем.— Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1981, № 6.
4. Кетков Ю. Л. Программирование на БЭСИКе.— М.: Статистика, 1978.
5. Крон Г. Применение тензорного анализа в электротехнике.— М.: Госэнергоиздат, 1955.
6. Сигорский В. П. Методы анализа электрических схем с многополюсными элементами.— Киев: Изд. АН УССР, 1958.
7. Максимович Н. Г. Линейные электрические цепи и их преобразования.— М.— Л.: Госэнергоиздат, 1961.
8. Петренко А. И., Власов А. И., Тимченко А. И. Табличные методы моделирования электронных схем на ЭЦВМ.— Киев: Вища школа, 1977.
9. Теоретические основы электротехники/Под ред. П. А. Ионкина.— М.: Высшая школа, 1976, т. 1.
10. Шакиров М. А. Преобразование и диакоптика электрических цепей.— Л.: Изд. ЛГУ, 1980.

[29.05.80]

# Исследование переходных процессов в электроприводе постоянного тока при изменении магнитного потока двигателя

КОЗЫРЕВ С. К., канд. техн. наук

Московский энергетический институт

Рассматриваются переходные процессы в электроприводе постоянного тока с двигателем независимого возбуждения при изменении магнитного потока  $\Phi$  в схеме двухзонного регулирования с зависимым управлением полем. Блок-схема электропривода приведена на рис. 1 [1]. Электропривод обеспечивает регулирование скорости как за счет изменения напряжения на якоре двигателя, питающегося от тиристорного преобразователя ТП, так и за счет изменения тока в обмотке возбуждения ОВД, получающей питание от тиристорного возбудителя ТВ. В рассматриваемом случае по первому каналу — каналу регулирования напряжения двигателя — схема представляет собой двухконтурную систему с регулятором тока РТ и регулятором скорости РС. По второму каналу — каналу регулирования потока — схема также двухконтурная и содержит регулятор тока возбуждения РТВ, регулятор э. д. с. двигателя РЭ и блок выделения модуля э. д. с. двигателя — выпрямитель В. Сигнал, пропорциональный э. д. с. двигателя, получается алгебраическим суммированием сигналов, пропорциональных напряжению  $u$  и току  $i$  двигателя. Скорость двигателя регулируется за счет напряжения на якоре двигателя при номинальном потоке  $\Phi_n$ , если модуль э. д. с. двигателя  $|e| < E_n$ , где  $E_n$  — номинальная э. д. с. двигателя, и далее за счет изменения потока  $\Phi$  при поддержании э. д. с. двигателя на постоянном уровне  $|e| = E_n$ .

В таких электроприводах, как правило, формируются равноускоренные переходные процессы за счет соответствующего изменения сигнала  $U_{ac}$  на входе схемы управления. При ослаблении потока двигателя и равноускоренных переходных процессах существенно возрастают ток якоря и потери в якорной цепи. Это увеличивает нагрев двигателя, что требует уменьшения максимальной скорости и может привести к снижению производительности. При оптимальных переходных процессах этого не должно произойти, так как потери в якорной цепи двигателя уменьшаются.

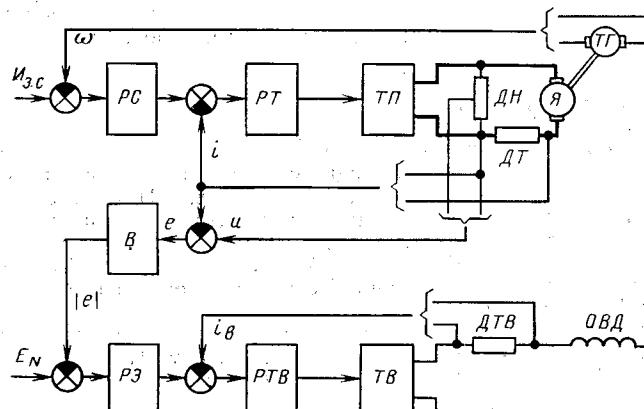


Рис. 1

Оптимальными при изменении потока двигателя считаются такие переходные процессы, которые при минимальных электрических потерях в якорной цепи обеспечивают либо заданное изменение скорости за заданное время, либо заданное перемещение за заданное время.

Оптимальные переходные процессы при номинальном потоке достаточно исследованы [2], при изменении потока они исследованы в меньшей степени. Автором статьи поставлена задача найти аналитические зависимости тока, скорости, перемещения и электрических потерь от времени при оптимальных переходных процессах как при отработке заданного изменения скорости, так и при отработке заданного перемещения.

Для нахождения оптимальных диаграмм тока и скорости при изменении потока в указанных случаях воспользуемся принципом максимума. Введем относительные значения тока  $i = I/I_n$ ; момента  $\mu = M/M_n$ ; скорости  $v = \omega/\omega_n$ ; потока  $f = \Phi/\Phi_n$ ; времени  $\tau = t/T_n$ ; электрических потерь в якорной цепи  $q = Q/Q_n$ . За базовые ток, момент, скорость и поток приняты номинальные значения этих величин, для времени  $T_n = \frac{\Phi_n}{M_n} j$ , для электрических потерь  $Q_n = I_n^2 R_j T_n$ , где  $R_j$  — сопротивление якорной цепи;  $j$  — суммарный момент инерции.

Система уравнений, описывающих переходные процессы в электроприводе при постоянном статическом моменте  $\mu_c = M_c/M_n$ , будет иметь вид:

$$\frac{dv}{d\tau} = if - \mu_c; \quad (1)$$

$$\frac{dq}{d\tau} = i^2; \quad (2)$$

$$fv = 1. \quad (3)$$

Исключим  $f$  из системы (1) — (3) и получим

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{i}{v} - \mu_c; \quad (4)$$

$$\frac{dq}{d\tau} = i^2. \quad (5)$$

Для системы (4) — (5)  $H$ -функция в соответствии с принципом максимума имеет вид

$$H = \Psi_1 \left( \frac{i}{v} - \mu_c \right) + \Psi_2 i^2, \quad (6)$$

где  $\Psi_1$ ,  $\Psi_2$  определяются из следующей системы уравнений:

$$\frac{d\Psi_1}{d\tau} = \Psi_1 \frac{i}{v^2}; \quad (7)$$

$$\frac{d\Psi_2}{d\tau} = 0. \quad (8)$$

Токовая диаграмма оптимальна на всем интервале изменения потока, если  $\partial H / \partial i = 0$ .

Дифференцируя (6) по току, запишем:

$$\frac{\partial H}{\partial i} = \Psi_1 + 2\Psi_2 i = 0. \quad (9)$$

Из (9) следует, что

$$\Psi_1 = -2\Psi_2 i v. \quad (10)$$

Дифференцируя (10) по  $\tau$  с учетом (8) и решая полученное уравнение совместно с (7), найдем после алгебраических преобразований с учетом (4) и (9):

$$\frac{di}{d\tau} = \frac{i \mu_c}{v}. \quad (11)$$

Дифференцируя ток  $i$  из (4) по  $\tau$  и решая полученное уравнение совместно с (11), будем иметь

$$\frac{d}{d\tau} \left( \frac{dv^2}{d\tau} \right) = 2\mu_c^2. \quad (12)$$

откуда после двукратного интегрирования получим

$$v = \sqrt{\mu_c^2 \tau^2 + C_1 \tau + C_2} \quad (13)$$

и с учетом (4)

$$i = \mu_c^2 \tau + \mu_c \sqrt{\mu_c^2 \tau^2 + C_1 \tau + C_2} + \frac{C_1}{2}, \quad (14)$$

где  $C_1, C_2$  постоянные интегрирования;  $C_2$  определяется из (13) с учетом начальных условий:  $\tau=0, v=v_{\text{нач}}$ , т. е.  $C_2=v_{\text{нач}}^2$ ;  $C_1$  определяется из (13) при  $\tau=\tau_{\text{зад}}, v=v_{\text{зад}}$ , т. е.

$$C_1 = \frac{v_{\text{зад}}^2 - v_{\text{нач}}^2 - \mu_c^2 \tau_{\text{зад}}^2}{\tau_{\text{зад}}}.$$

Полученные уравнения (13) и (14) описывают оптимальные диаграммы скорости  $v$  и тока  $i$  при отработке заданного изменения скорости изменением потока при постоянном значении  $e=E_h$  и постоянном моменте сопротивления  $\mu_c$ . При  $\mu_c=0$  эти уравнения существенно упрощаются

$$v = \sqrt{\frac{v_{\text{зад}}^2 - v_{\text{нач}}^2}{\tau_{\text{зад}}}} \tau + v_{\text{нач}}; \quad (15)$$

$$i = \frac{v_{\text{зад}}^2 - v_{\text{нач}}^2}{2\tau_{\text{зад}}}. \quad (16)$$

Как видно из (16), при изменении потока и при  $\mu_c=0$  ток якоря должен поддерживаться постоянным. Следует отметить, что уравнение, аналогичное (15), было получено в [2] иным путем.

На рис. 2 приведены кривые скорости и тока (1 и 3), рассчитанные по (15) и (16), а также для сравнения построены аналогичные кривые при равноускоренном переходном процессе (кривые 2 и 4). При этом в обоих случаях скорость двигателя изменяется от  $v_{\text{нач}}=1$  до  $v_{\text{зад}}=2$  за одно и то же время  $\tau_{\text{зад}}=1$ . Электрические потери в якорной цепи  $q = \int_0^{\tau_{\text{зад}}} i^2 dt$  для оптимальной диаграммы тока составляют

$$q_{\text{опт}} = \frac{e}{4} (v_{\text{зад}}^2 - v_{\text{нач}}^2) (v_{\text{зад}} + v_{\text{нач}}),$$

где

$$\varepsilon = \frac{v_{\text{зад}} - v_{\text{нач}}}{\tau_{\text{зад}}}.$$

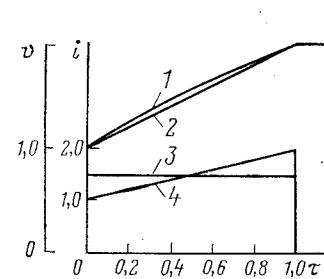


Рис. 2

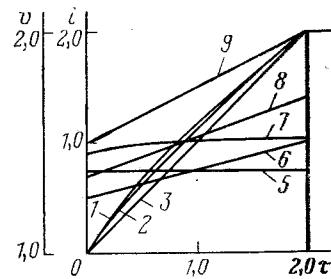


Рис. 3

При равноускоренном переходном процессе эти же потери равны

$$q_{\text{рж}} = \frac{\varepsilon}{3} (v_{\text{зад}}^3 - v_{\text{нач}}^3).$$

Относительное увеличение потерь при переходе от оптимальных тахограмм к равноускоренным составит

$$\Delta q = \frac{q_{\text{рж}} - q_{\text{опт}}}{q_{\text{опт}}} = \frac{1}{3} \frac{(v_{\text{зад}} - v_{\text{нач}})^2}{(v_{\text{зад}} + v_{\text{нач}})^2}.$$

Так, для случая, изображенного на рис. 2,  $\Delta q = 0,037$ , т. е. электрические потери при равноускоренном разгоне на 3,7 % больше, чем при оптимальных диаграммах.

На рис. 3 представлены кривые скорости (1, 2, 3) и тока (5, 7, 9) для различных значений статического момента ( $\mu_c=0, 0,2, 0,5$ ), рассчитанные по уравнениям (13) и (14), а также для равноускоренных переходных процессов (6, 8, 9) при тех же значениях  $\mu_c$ . Как видно из рис. 3, с увеличением статического момента оптимальные диаграммы скорости деформируются и приближаются к диаграмме равноускоренного процесса. Для рассмотренного примера при  $\mu_c=0,5$  оптимальная диаграмма, рассчитанная по (13), совпадает с диаграммой равноускоренного разгона.

Соответственно деформируются с ростом  $\mu_c$  и оптимальные диаграммы тока. Из сравнения кривых тока 5 и 6, 7 и 8 видно, что оптимальные диаграммы тока с ростом  $\mu_c$  приближаются к диаграммам тока при равноускоренном процессе. При  $\mu_c=0,5$  диаграмма тока, рассчитанная по (14), полностью совпадает с диаграммой при равноускоренном процессе — кривая 9.

Для нахождения оптимальных диаграмм при отработке заданного перемещения система уравнений (4)–(5), описывающих переходные процессы в электроприводе, должна быть дополнена уравнением

$$\frac{d\phi}{dt} = v, \quad (17)$$

где  $\phi = \frac{\alpha}{\alpha_h}$  — перемещение, отн. ед.; за базовую величину перемещения принято  $\alpha_h = T_h \omega_h = \frac{j \omega_h^2}{M_h}$ .

Согласно принципу максимума  $H$ -функция определяется как

$$H = \Psi_1 v + \Psi_2 \left( \frac{i}{v} - \mu_c \right) + \Psi_3 i^2, \quad (18)$$

а сопряженная система имеет вид:

$$\frac{d\Psi_1}{dt} = 0; \quad (19)$$

$$\frac{d\Psi_2}{dt} = -\Psi_1 + \Psi_2 \frac{i}{v^2}; \quad (20)$$

$$\frac{d\Psi_3}{dt} = 0. \quad (21)$$

Токовая диаграмма будет оптимальной на всем интервале, если выполняется уравнение

$$\frac{\partial H}{\partial i} = \frac{\Psi_2}{v} + 2\Psi_3 i, \quad (22)$$

откуда

$$\Psi_2 = -2\Psi_3 i v. \quad (23)$$

Из (19) и (21) следует, что  $\Psi_1 = C_1$ ,  $\Psi_3 = C_3$  и не зависят от времени. Дифференцируя (23) по  $t$  и решая полученное уравнение совместно с (20), после преобразований получаем

$$\frac{di}{dt} = \left( \frac{1}{C_2} + \mu_c i \right) \frac{1}{v}, \quad (24)$$

где

$$C_2 = \frac{2C_3}{C_1}.$$

В результате имеем систему дифференциальных уравнений, решение которой дает оптимальные диаграммы тока и скорости:

$$\frac{di}{dt} = \left( \frac{1}{C_2} + \mu_c i \right) \frac{1}{v}; \quad (25)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{i}{v} - \mu_c; \quad (26)$$

$$\frac{dq}{dt} = i^2; \quad (27)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = v. \quad (28)$$

Поделив (26) на (25) при  $\mu_c = 0$ , получим

$$dv = C_2 idt,$$

откуда после интегрирования найдем

$$v = \frac{1}{2} C_2 i^2 + C_4. \quad (29)$$

Решая совместно (29) и (25), после интегрирования будем иметь

$$\tau = \frac{C_2^2}{6} i^3 + C_2 C_4 i + C_5. \quad (30)$$

Продифференцировав (30) и подставив  $dt$  в (28), с учетом (29) получим после преобразований

$$\varphi = \frac{1}{20} C_2^3 i^5 + \frac{1}{3} C_2^2 C_4 i^3 + C_2 C_4 i + C_6. \quad (31)$$

Проведя аналогичные преобразования, получим уравнение для электрических потерь

$$q = \frac{1}{10} C_2^2 i^5 + \frac{1}{3} C_2 C_4 i^3 + C_7. \quad (32)$$

По (29), (30), (31) и (32) могут быть рассчитаны и построены зависимости скорости, тока, перемещения и электрических потерь в якорной цепи от времени. Постоянные интегрирования  $C_2$ ,  $C_4$ ,  $C_5$ ,  $C_6$  и  $C_7$  определяются на основании исходных данных:  $v_{\text{нач}}$ ,  $\Phi_{\text{нач}}$ ,  $\Phi_{\text{зад}}$ ,  $q_{\text{нач}}$ ,  $\tau_{\text{зад}}$ .

На рис. 4 приведены рассчитанные по (29) и (30) оптимальные диаграммы скорости и тока (кривые 1 и 4) при отработке перемещения  $\Phi_{\text{зад}} = 3$  за время  $\tau_{\text{зад}} = 2$ . Принято, что  $v_{\text{нач}} = v_{\text{кон}} = 1$ . Там же для сравнения при-

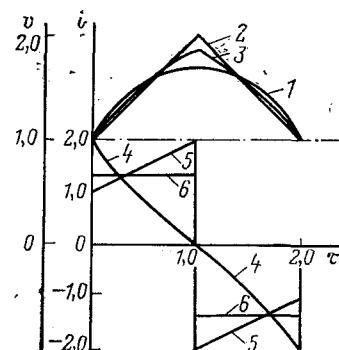


Рис. 4

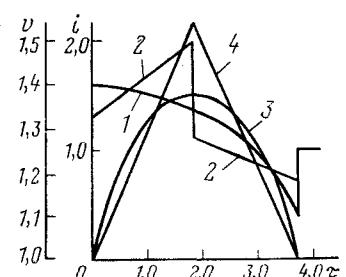


Рис. 5

ведены диаграммы скорости и тока для равноускоренного переходного процесса (кривые 2 и 5) и кривые при переходном процессе с постоянным током (кривые 3 и 6).

Электрические потери в якорной цепи в относительных единицах для указанных вариантов составили соответственно 2,332; 4,36 и 3,21. Потери при равноускоренных процессах при отработке перемещения в данном примере почти в два раза больше, чем при оптимальных диаграммах. Потери при прямоугольной токовой диаграмме существенно меньше, но и они на 38 % больше, чем при оптимальной диаграмме.

Считается [3], что при статических моментах  $\mu_c \neq 0$  аналитическое решение системы (25)–(28) отсутствует, и оптимальные диаграммы скорости и тока, а также электрические потери в якорной цепи находятся в результате численного решения этой системы. В статье получено аналитическое решение этой задачи. Найдена оптимальная диаграмма динамического тока  $i_d$ . При этом учитывалось, что ток якоря  $i = i_d + i_c$ , где  $i_c = \mu_c v$  статическая составляющая тока якоря.

Система уравнений, описывающих переходные процессы в электроприводе, в этом случае будет иметь вид:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{i_d}{v}; \quad (33)$$

$$\frac{dq}{dt} = (i_d + \mu_c v)^2; \quad (34)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = v. \quad (35)$$

В соответствии с принципом максимума  $H$ -функция определяется как

$$H = \Psi_1 \frac{i_d}{v} + \Psi_2 (i_d + \mu_c v)^2 + \Psi_3 v, \quad (36)$$

а сопряженная система будет иметь вид:

$$\frac{d\Psi_1}{dt} = \Psi_1 \frac{i_d}{v^2} - \Psi_2 2\mu_c (i_d + \mu_c v) - \Psi_3; \quad (37)$$

$$\frac{d\Psi_2}{dt} = 0; \quad (38)$$

$$\frac{d\Psi_3}{dt} = 0. \quad (39)$$

Диаграмма динамического тока будет оптимальной на всем интервале изменения потока, если  $\partial H / \partial i_d = 0$ . Дифференцируя (36) по динамическому току, имеем

$$\frac{\partial H}{\partial i_d} = \frac{\Psi_1}{v} + 2\Psi_2 (i_d + \mu_c v) = 0. \quad (40)$$

Из (40) следует, что

$$\Psi_1 = -2\Psi_2 i_d v - 2\Psi_2 \mu_c v^2. \quad (41)$$

Дифференцируя (41) и решая совместно полученные выражение с (37) и (41), с учетом (33) получим

$$2i_d di_d = \frac{2\mu_c^2 \Psi_2 v + \Psi_3}{\Psi_2} dv. \quad (42)$$

После интегрирования (42) найдем

$$i_d = \pm \sqrt{\mu_c^2 v^2 + C_1 v + C_2}, \quad (43)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — постоянные, определяемые на основании исходных данных; знак «+» берет для случая разгона двигателя, знак «—» торможения. Полный ток якоря

$$i = \mu_c v \pm \sqrt{\mu_c^2 v^2 + C_1 v + C_2}. \quad (44)$$

Подставив из (43)  $i_d$  в (33), получим

$$dt = \frac{v dv}{\sqrt{\mu_c^2 v^2 + C_1 v + C_2}}, \quad (45)$$

откуда после интегрирования найдем

$$\tau = \frac{\sqrt{\mu_c^2 v^2 + C_1 v + C_2}}{\mu_c^2} - \frac{C_1}{2\mu_c^3} \ln \left[ C_3 \left( 2\mu_c \sqrt{\mu_c^2 v^2 + C_1 v + C_2} + 2\mu_c^2 v + C_1 \right) \right]. \quad (46)$$

Для заданного перемещения  $\Phi_{зад}$  и времени его отработки  $\tau_{зад}$  получим

$$\Phi_{зад} = \frac{3C_1 - 4\mu_c^2 C_2}{4\mu_c^5} \ln \frac{2\mu_c^2 v_{max} + C_1}{2\mu_c i_{нач} + 2\mu_c^2 v_{нач} + C_1} - i_{нач} \left( \frac{v_{нач}}{\mu_c^2} - \frac{3C_1}{2\mu_c^4} \right); \quad (47)$$

$$\tau_{зад} = \frac{C_1}{\mu_c^3} \ln \frac{2\mu_c i_{нач} + 2\mu_c^2 v_{нач} + C_1}{2\mu_c^2 v_{max} + C_1} - \frac{2i_{нач}}{\mu_c^2}. \quad (48)$$

Постоянные  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  определяются по известным значениям  $i_{нач}$ ,  $v_{нач}$ ,  $v_{max}$ :

$$C_1 = -\frac{i_{нач}^2 + \mu_c^2 (v_{max}^2 - v_{нач}^2)}{v_{max} - v_{нач}}; \quad (49)$$

$$C_2 = \frac{v_{max}}{v_{max} - v_{нач}} [i_{нач}^2 + \mu_c^2 v_{нач} (v_{max} - v_{нач})]; \quad (50)$$

$$C_3 = \frac{e^{\frac{2\mu_c i_{нач}}{C_1}}}{2\mu_c i_{нач} + 2\mu_c^2 v_{нач} + C_1}. \quad (51)$$

Уравнение для электрических потерь в якорной цепи двигателя при оптимальных переходных процессах определяется из (34) с учетом (46) после интегрирования

$$q = i_{нач} \left( \frac{2C_1 \mu_c^2 v_{нач} - C_1^2 + 2\mu_c^2 C_2}{\mu_c^4} \right) - \frac{4}{3} \frac{i_{нач}^3}{\mu_c^2} + \frac{C_1^3 - 2\mu_c^2 C_1 C_2}{2\mu_c^5} \ln \frac{2\mu_c i_{нач} + 2\mu_c^2 v_{нач} + C_1}{2\mu_c^2 v_{max} + C_1}. \quad (52)$$

На рис. 5 приведены оптимальные кривые тока и скорости (1 и 3) при отработке заданного перемещения  $\Phi_{зад}=4,72$  за время  $\tau_{зад}=3,72$  при статическом моменте  $\mu_c=1$ , рассчитанные по (44) и (46). Здесь же для сравнения представлены кривые тока и скорости (2 и 4) при отработке такого же перемещения за то же время, но при равноускоренном процессе.

Наличие статического момента несколько снижает эффективность перехода к оптимальным диаграммам. Так, на холостом ходу при отработке одного и того же перемещения за одно время потери при равноускоренном процессе для рассмотренного примера на 75 % больше, чем при оптимальных диаграммах. При наличии же значительного статического момента ( $\mu_c=1$ ) потери в якорной цепи при равноускоренных процессах на 14 % больше, чем при оптимальных диаграммах.

Найденные здесь аналитические зависимости тока и скорости от времени для оптимальных переходных процессов при изменении потока двигателя могут быть использованы при проектировании и разработке электроприводов с двухзонным регулированием. Применение оптимальных переходных процессов позволит снизить электрические потери в якорной цепи двигателя, что откроет дополнительный резерв повышения производительности в условиях ограничений по нагреву или обеспечит экономию электрической энергии при заданном уровне производительности.

#### Список литературы

- Бычков В. П. Электропривод и автоматизация металлургического производства. — М.: Высшая школа, 1977.
- Петров Ю. П. Оптимальное управление электроприводами. — М.: Госэнергоиздат, 1961.
- Оптимальные скоростные режимы двигателя валков реверсивного обжимного стана при работе с ослаблением потока возбуждения /Х. В. Гемская, А. В. Коганов, В. Л. Стефанович М. Я. Флейшман.— Изв. вузов. Электромеханика, 1977, № 5 [24.09.8]



# Из опыта работы

УДК 621.316.37.027.8.064.1.001.24

## Распределение токов при однофазном коротком замыкании в распределительстве высокого напряжения

МОЗЫРСКИЙ В. И., инж.

Киевское отделение УГПИ Тяжпромэлектропроект

При однофазном к. з. в распределительстве (РУ) 110 кВ и выше с присоединенным к нему ВЛ часть тока к. з.  $I_3$  стекает через заземляющее устройство (ЗУ) в землю. Другая часть обратного тока к. з.  $I_t$  возвращается к источнику питания через системы «трос — опоры» (СТО).

Расчет значений  $I_3$  и  $I_t$  требуется при проектировании соответственно заземления РУ высокого напряжения и проверке защитных тросов на термическую устойчивость [1]. В расчете ЗУ при присоединении к нему СТО со стальными грозозащитными тросами (ГТ) «отсос» СТО части тока к. з. учитывается уменьшением сопротивления ЗУ до величины  $r_a$ , которое определяется эквивалентированием параллельно соединенных входных сопротивлений СТО и чисто активных сопротивлений растекания тока  $r_p$  заземлителей РУ (как искусственных, так и естественных). Очевидно, что при этом для определения напряжения на заземлителе РУ и напряжения прикосновения — главном критерии электробезопасности, отпадает необходимость в расчете  $I_3$ , а используется суммарный ток  $I_k$ , протекающий к месту к. з. по ВЛ, т. е. значение разности полного тока к. з. и уточненных величин токов нулевой последовательности нейтралей, присоединенных к ЗУ.

Сопротивление СТО со стальными ГТ определяется без учета реактивных сопротивлений тросов и сопротивлений взаимоиндукции между ВЛ и ГТ [2]. Пренебрежение вышеуказанными сопротивлениями в этом случае оправдано, так как они значительно меньше активных сопротивлений тросов и практически не влияют на значение напряжений прикосновения и заземлителя РУ. Однако в настоящее время, в связи со значительным ростом уровней токов однофазных к. з. в энергосистемах,

зачастую находят применение ГТ, выполненные из цветного металла (стальалюминиевый провод). Активное сопротивление такого ГТ на порядок ниже, чем у стального, и пренебрежение реактивной составляющей его сопротивления и сопротивлением взаимоиндукции уже недопустимо. При учете взаимоиндукции между ВЛ и ГТ замена величин  $I_3$  и  $r_p$  на  $I_k$  и  $r_a$  уже не будет адекватной с точки зрения определения напряжений прикосновения и напряжения заземлителя РУ, как это имеет место для СТО со стальными тросами.

Целью настоящей работы является получение математических выражений для инженерного расчета тока  $I_3$ , стекающего в землю с ЗУ в установившемся режиме однофазного к. з. на РУ высокого напряжения при присоединении к нему ВЛ с тросами.

На рис. 1 представлен эскиз подхода ВЛ к РУ высокого напряжения подстанции, а на рис. 2 схема замещения для расчета распределения тока при однофазном к. з. Для того чтобы не усложнять рисунок, схема замещения приведена только для одной ВЛ —  $L_1$ , с тросом  $T_1$ . Остальные линии и тросы, присоединенные к РУ, имеют аналогичные схемы замещения. Схема замещения СТО (рис. 2) является схемой с каскадно соединенными четырехполюсниками, элементы которых — сопротивление троса в пролете  $z_t$ , сопротивление взаимоиндукции между проводами ВЛ и тросом в пролете  $x'_{n,t}$  и сопротивление заземления опор ВЛ  $r_0$ . СТО замкнута на сопротивление  $z_m$ , которое равно либо сопротивлению заземлителя соседнего РУ (в расчете может быть принято равным 0,5 Ом), либо входному сопротивлению участка с другими значениями  $z_t$  или  $r_0$ , если такой имеется.

При выведении формул для определения  $I_3$  принимаем следующие допущения:

величина тока однофазного к. з., текущего по ВЛ и его распределение между ЗУ и СТО являются величинами независимыми и могут рассчитываться раздельно;

сопротивление току в земле (при промышленной частоте 0,05 Ом/км) по сравнению с погонными сопротивлениями тросов и сопротивлениями заземления опор мало, и для упрощения расчетов им можно пренебречь;

влиянием э. д. с., наводимых в рассматриваемом тросе проводами соседних линий при протекании по ним токов однофазных к. з. и частично компенсирующих их э. д. с., наводимых тросами соседних линий, можно пренебречь.

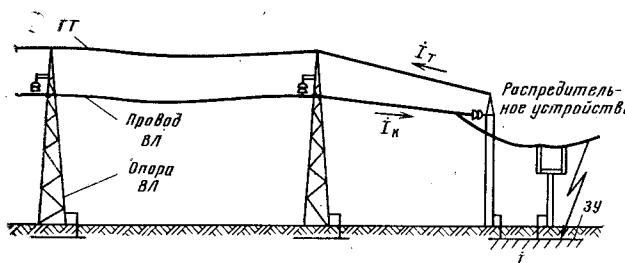


Рис. 1

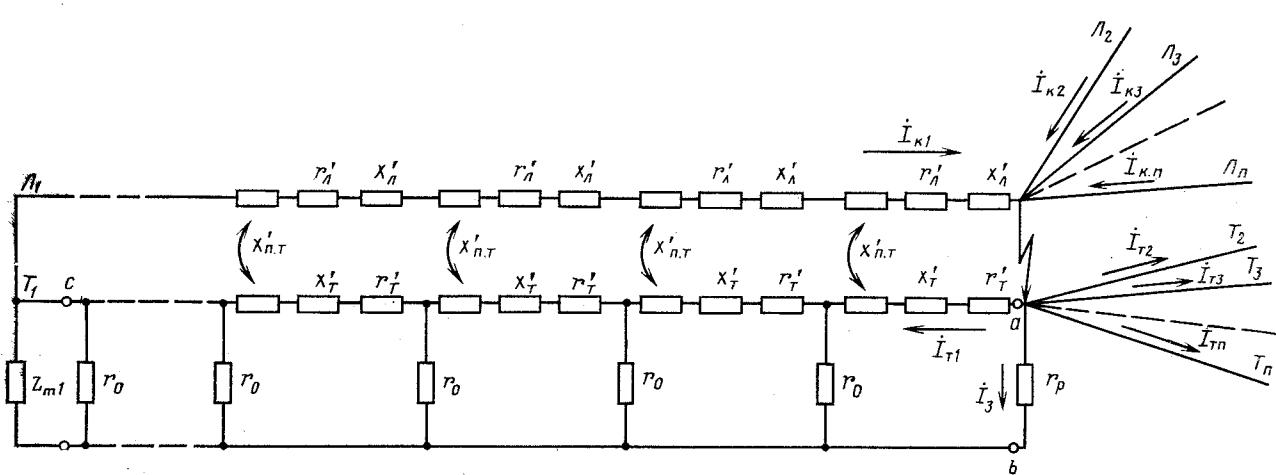


Рис. 2

Надо отметить, что исходная информация для расчетов заземления имеет, как правило, невысокую точность и определяется многими факторами, находящимися в сложной стохастической взаимосвязи. Поэтому вышеуказанные допущения лишь незначительно влияют на точность вычислений, носящих практически оценочный характер.

Расчет распределения тока к. з. произведем, считая, что к шинам РУ присоединена одна линия, а затем обобщим полученные результаты на  $n$  линий. Наиболее просто искомые результаты могут быть получены при помощи теоремы вариации для СТО, выполненной по всей длине одним и тем же ГТ (однородная СТО). Допустим, что в схеме на рис. 2 все поперечные сопротивления  $r_p$ ,  $r_0$ ,  $z_m$  равны нулю. Тогда электродвигущая сила, наводимая током линии в каждом пролете трося уравновешивается падением напряжения от тока, протекающего в этом пролете. Ток в трофе, вызванный этой э. д. с. в любом из пролетов, прямо пропорционален сопротивлению взаимоиндукции между проводами ВЛ и ГТ  $x_{n,t}$  и обратно пропорционален сопротивлению системы «трос — земля»  $z'_t$  (сопротивления отнесены к длине пролета). Так как для однородной СТО для всех пролетов  $x_{n,t}/z'_t = \text{const}$  этот ток в каждом пролете независимо от его длины имеет одинаковое значение, а значит,  $i_{0p1} = i_{0p2} = i_{0p3} = \dots = 0$ . На основании второго закона Кирхгофа при равных нулю поперечных сопротивлениях для схемы на рис. 2 можно записать:

$$j i_{k1} x'_{n,t} - i'_{t1} z'_t = 0, \quad (1)$$

где  $i_{k1} = 3 i_0$  — ток однофазного к. з., текущий по  $L_1$  (утренний ток нулевой последовательности);  $i'_{t1}$  — составляющая обратного тока однофазного к. з., протекающего по трофе  $T_1$ , вызванная наведенной э. д. с.

Согласно [3]

$$z'_t = (r_t + jx_t) l_{np} = \left( r_t + j \cdot 0,145 \lg \frac{D_3}{R_0} \right) l_{np}, \quad (2)$$

где  $r_t$  и  $x_t$  — активное и реактивное погонные сопротивления трофе;  $R_0$  — эквивалентный радиус провода, значение которого для сталеалюминиевого трофе составляет  $0,95 R$  ( $R$  — истинный радиус ГТ);  $l_{np}$  — длина пролета с трофеом, заземленным по его концам.

Для ВЛ с двумя трофами в формулу (2) вместо  $R_0$  следует вводить средний геометрический радиус  $R_{cp}$ , который находится из выражения

$$R_{cp} = \sqrt{R_0 a}, \quad (3)$$

где  $a$  — расстояние между трофами.

Эквивалентная глубина возврата тока через землю определяется по формуле Карсона:

$$D_3 = 93,5 \sqrt{a}, \quad (4)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление земли.

Расчетное выражение для сопротивления взаимоиндукции между проводами ВЛ и ГТ в пролете имеет вид:

$$x'_{n,t} = 0,145 l_{np} \lg \frac{D_3}{a_{n,t}}, \quad (5)$$

где  $a_{n,t}$  — среднее геометрическое расстояние между проводами и трофеом линии с полным циклом транспозиций.

Решая уравнение (1), находим:

$$\left. \begin{aligned} i'_{t1} &= \frac{j i_{k1} x'_{n,t1}}{z'_t}; \\ i'_{31} &= i_{k1} - i_{t1} = i_{k1} - j \frac{i_{k1} x'_{n,t1}}{z'_t}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

При присоединении к распредустройству  $n$  линий составляющая тока, стекающая в землю (обусловлена наведенной э. д. с.),

$$i'_{3} = i_k - \sum_{n=1}^n i_{kn} \frac{j x'_{n,t_n}}{z'_{tn}}, \quad (7)$$

где

$$i_k = \sum_{n=1}^n i_{kn}.$$

Действительное значение тока, стекающего в землю, определяется как сумма составляющей  $i'_3$  и приращения тока, вызванного наличием сопротивления  $r_p$ . На основании теоремы вариации можно записать для приращения тока:

$$i''_3 = - \frac{r_p i'_3 g_{p,p}}{1 + r_p g_{p,p}} = - \frac{r_p i'_3 \sum_{n=1}^n \frac{1}{z_{bx,n}}}{1 + r_p \sum_{n=1}^n \frac{1}{z_{bx,n}}}, \quad (8)$$

где  $g_{p,p} = \sum_{n=1}^n \frac{1}{z_{bx,n}}$  — суммарная входная проводимость систем «трос — опоры» относительно точек  $a$  и  $b$  (рис. 2);  $z_{bx1}, z_{bx2}, \dots, z_{bxn}$  — входные сопротивления СТО линий  $L_1, L_2, \dots, L_n$  относительно точек  $a$  и  $b$ ; знак «минус» в выражении (8) объясняется тем, что наличие сопротивления  $r_p$  приводит к уменьшению тока, стекающего в землю при к. з. на РУ.

Приращение тока на концевом участке  $T_1$ :

$$i''_{t1} = \frac{r_p i'_3 \sum_{n=1}^n \frac{1}{z_{bx,n}}}{\left( 1 + r_p \sum_{n=1}^n \frac{1}{z_{bx,n}} \right) \left( 1 + z_{bx1} \sum_{n=2}^n \frac{1}{z_{bx,n}} \right)}. \quad (9)$$

Входное сопротивление СТО может быть вычислено на основании теории четырехполюсников. При этом в качестве математической модели СТО может быть использована цепная схема, например Т-образная (концевой пролет ВО обычно невелик и сопротивление трофе в нем принимаем равным  $z'_t/2$ ), входное сопротивление которой определяется по выражению

$$z_{bx} = \frac{z_m z_c + z_c^2 \operatorname{th} m\gamma}{z_c + z_m \operatorname{th} m\gamma}, \quad (10)$$

где  $z_c = \sqrt{z'_t/4 + r_0 z'_t}$  — характеристическое сопротивление схемы;  $\gamma = \ln \left( 1 + \frac{z'_t}{2r_0} + \sqrt{\frac{z'_t}{r_0} + \frac{z'_t}{4r_0^2}} \right)$  — постоянная передачи элемента цепной схемы;  $m$  — число элементов цепной схемы (число опор в СТО).

Выражения для  $\gamma$  и  $z_c$  могут быть упрощены и представлены в виде

$$\gamma \approx \sqrt{z'_t/r_0}; \quad (11)$$

$$z_c \approx \sqrt{z'_t r_0}. \quad (12)$$

Определим, при каких значениях величин  $z'_t$  и  $r_0$  возможны упрощения (11) и (12). Для этого, задаваясь точностью расчетов 5%, составим уравнения:

$$\frac{\sqrt{z'_t/r_0}}{\ln \left( 1 + \frac{z'_t}{2r_0} + \sqrt{\frac{z'_t}{r_0} + \frac{z'_t}{4r_0^2}} \right)} = 1,05; \quad (13)$$

$$\frac{\sqrt{z'_t/4 + z'_t r_0}}{\sqrt{r_0 z'_t}} = 1,05. \quad (14)$$

Решая уравнение (13) относительно  $z'_t/r_0$  (величиной  $z'_t/4r_0^2$  можно пренебречь, так как она в десятки раз меньше

$r_0$  одним из численных методов, например методом Ньютона, получаем  $z'_T/r_0 \approx 0,5$ . Корнем уравнения (14) является  $r_0 \approx 2,5$ . Таким образом, выражения (11) и (12) дают достаточно точные результаты при  $0 \leq z'_T/r_0 \leq 0,5$  и  $r_0 \geq 2,5$  [Ом], что для еальных СТО практически всегда выполняется.

При больших значениях  $m$ , когда  $\operatorname{th} m \gamma \approx 1$ , независимо от величины  $z_m$ ,  $z_{\text{вх}} \approx 2$  с. Определим значение  $m$ , при котором выполняется это условие, для чего сделаем некоторые преобразования:

$$\begin{aligned} \operatorname{th} m \gamma &\approx \operatorname{th} m \sqrt{\frac{z'_T}{r_0}} = \operatorname{th} m \sqrt{\frac{r'_T}{r_0}} \sqrt{1 + j \frac{x'_T}{r'_T}} = \\ &= \operatorname{th} m \sqrt{\frac{r'_T}{2r_0}} \left( \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{x'_T}{r'_T}\right)^2}} + 1 + \right. \\ &\quad \left. + j \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{x'_T}{r'_T}\right)^2} - 1} \right) = \operatorname{th}(t + jh) = \\ &= \frac{\sinh 2t}{\cosh 2t + \cos 2h} + j \frac{\sin 2h}{\cosh 2t + \cos 2h}. \end{aligned} \quad (15)$$

Очевидно, что для выполнения приближенного равенства  $\operatorname{th} m \gamma \approx 1$  должны соблюдаться два условия:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Re}[\operatorname{th} m \gamma] &= \frac{\sinh 2t}{\cosh 2t + \cos 2h} \gg \operatorname{Im}[\operatorname{th} m \gamma] = \\ &= \frac{\sin 2h}{\cosh 2t + \cos 2t}; \\ &\frac{\sinh 2t}{\cosh 2t + \cos 2h} \approx 1. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Эти условия с достаточной точностью выполняются при  $\approx 3$  независимо от величины  $h$  [4]. Таким образом, искомое выражение для  $m$  после несложных преобразований приобретает вид

$$m_c = \frac{4,2 \sqrt{r_0}}{\sqrt{r'_T + |z'_T|}}. \quad (17)$$

В случаях, когда среди ВЛ, присоединенных к РУ, имеются линии с ГТ, заземленными только по концам ВЛ (например, при использовании ГТ для высокочастотной связи или защиты), эти линии в расчете по формулам (6) — (9) принимаются как однопролетные с длиной пролета, равной длине линий.

Зачастую, по условию термической устойчивости к токам к. з. на походе к РУ в качестве ГТ используются сталь-алюминиевые провод, а на участках ВЛ, удаленных от РУ, — стальной трос, т. е. СТО является неоднородной. В этом случае распределение тока несколько усложняется. Дело в том, что неоднородная СТО линии  $L_1$  имеет участок с различным значением  $x_{\text{п.т.}}/z_T$ , а значит, и с различными значениями составляющих тока в трофе  $I'_T$ . При закороченных поперечных сопротивлениях схемы замещения на  $v$ -й опоре рис. 3, расположенной на границе участков 1 и 2 (точка неоднородности), будет пропе-

кать ток, уравновешивающий токи этих участков, обусловленные наведенной э. д. с.:

$$I_{0\text{п.в}} = I_{\text{к1}} \left( \frac{jx'_{\text{п.т.11}}}{z'_{\text{п.т.11}}} - \frac{jx'_{\text{п.т.12}}}{z'_{\text{п.т.12}}} \right), \quad (18)$$

где  $\frac{jx'_{\text{п.т.11}}}{z'_{\text{п.т.11}}}$  и  $\frac{jx'_{\text{п.т.12}}}{z'_{\text{п.т.12}}}$  — отношения сопротивления взаимо-

индукции проводов ВЛ и троса к сопротивлению троса в пролете соответственно на участках 1 и 2.

В остальных ветвях с закороченными сопротивлениями  $r_0$  уравнительные токи, как и прежде, будут отсутствовать. Изменение тока, стекающего в землю при однофазном к. з. на РУ, на величину  $I''_3$  и изменение тока на концевом участке ВЛ на величину  $I''_T$  можно определить с помощью теоремы о компенсации. Участок СТО, прилегающий к РУ, представляет собой однородную Г-цепную схему с входным сопротивлением относительно точек  $a'$  и  $b'$   $z_{\text{вх11}}$ . Второй участок заменен сопротивлением  $z_{\text{вх12}}$ , равным его входному сопротивлению.

Для определения напряжения и тока на выходе цепной схемы (рис. 3) воспользуемся уравнением четырехполюсника в А-форме, записанным в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} U''_{\text{вых}} \\ I''_{\text{вых}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U''_{\text{вх}} \\ I''_{\text{вх}} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где  $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$  — невырожденная матрица коэффициентов эквивалентного четырехполюсника; эта матрица может быть определена через коэффициенты Г-образных звеньев цепной схемы  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$ ,  $D'$ :

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix}^{v-1} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{z'_{\text{T11}}}{r_0} & z'_{\text{T11}} \\ \frac{1}{r_0} & 1 \end{bmatrix}^{v-1}. \quad (20)$$

Учитывая, что  $I''_3 = \frac{U''_{\text{вых}}}{r_p}$ , а изменение тока на концевом участке  $I''_T = I''_{\text{вых}}$ , для схемы на рис. 3 можно записать:

$$\begin{bmatrix} I''_3 \\ I''_T \end{bmatrix} = \frac{I_{0\text{п.в}} r_0 z_{\text{вх12}}}{r_0^2 z_{\text{вх11}} + r_0 z_{\text{вх12}} + z_{\text{вх11}} z_{\text{вх12}}} \begin{bmatrix} D/r_p & -B/r_p \\ -C & A \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} z_{\text{вх11}} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Входное сопротивление определяется либо по (10), либо по известному из теории цепей выражению (более точное значение):

$$z_{\text{вх11}} = \frac{Az_m + B}{Cz_m + D}, \quad (22)$$

где  $z_m$  — эквивалентное сопротивление параллельно соединенных входных сопротивлений других СТО, присоединенных к заземлителю РУ, и сопротивления  $r_p$ .

Наличие последующих неоднородностей в СТО линии  $L_1$ , удаленных от РУ, не оказывает существенного влияния на распределение тока однофазного к. з. из-за резкого снижения значений  $I''_3$  и  $I''_T$  с увеличением количества опор между точкой неоднородности и РУ. Изменения токов, вызванные неоднородностями в других линиях, определяются аналогично. Если рассматриваемая линия  $L_1$  имеет незначительное количество опор с заземленным на них тросом ( $m < m_c$ ), то необходимо учитывать влияние сопротивления  $z_m$  соседнего РУ на распределение тока однофазного к. з. между ЗУ и СТО. Составляющие полного тока, стекающего в землю  $I_{3m}$ , и тока на концевом участке троса ВЛ  $I_{Tm}$ , вызванные наличием сопротивления  $z_m$  соседнего РУ в схеме замещения (рис. 2), могут быть опре-

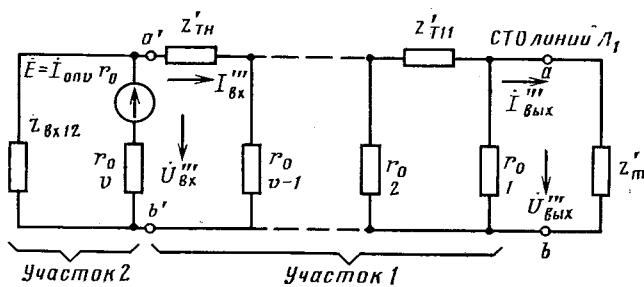


Рис. 3

лены по выражению:

$$\begin{bmatrix} I_{3m} \\ I_{tm} \end{bmatrix} = \frac{i'_{t1} z_{m1}}{z_{m1} + z_{bx\ m}} \begin{bmatrix} D/r_p & -B/r_p \\ -C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{bx\ m} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

где  $z_{bx\ m}$  — входное сопротивление СТО относительно точек  $c$  и  $d$  (рис. 2).

Коэффициенты эквивалентного четырехполюсника определяются по выражению (20), в котором величина  $v - 1$  меняется на  $m$ . В частном случае, при ГТ, заземленном только по концам ВЛ ( $r_0 = \infty$ ;  $m = 1$ ), выражение (23) приобретает вид:

$$\begin{bmatrix} I_{3m} \\ I_{tm} \end{bmatrix} = \frac{i'_{t1} z_{m1}}{z_{m1} + z_{bx\ m}} \begin{bmatrix} 1/r_p & -z'_{t1}/r_p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{bx\ m} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

В выражении (24)  $z'_{t1}$  — сопротивление троса линии  $L_1$ , а

$$z_{bx\ m} = z'_{t1} + \frac{r_p}{r_p \sum_{n=2}^m \frac{1}{z_{bx\ n}} + 1} \text{ — входное сопротивление ее СТО.}$$

Полные токи  $I_3$  и ток на концевом участке троса линии  $L_1$  определяются согласно принципу наложения:

$$\left. \begin{aligned} I_3 &= i'_{t1} + i''_{t1} + i'''_{t1c} - i_{3mc}; \\ i'_{t1} &= i'_{t1} + i''_{t1} - (i'''_{t1} - i'''_{t1c}) - (i_{t1m} - i_{t1mc}), \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где  $i'''_{t1c} = \sum_{k=1}^k i'''_{t1k}$  и  $i'''_{t1c} = \frac{r_p}{z_{bx1}} \sum_{k=2}^k i'''_{t1k}$  — соответственно

суммарные составляющие тока, стекающего в землю и текущего по концевому участку троса линии  $L_1$ , обусловленные наличием неоднородностей (число линий с неоднородностями  $k$ );

$$i_{3mc} = \sum_{n=1}^n i_{3mn} \text{ и } i_{t1mc} = \frac{r_p}{z_{bx1}} \sum_{n=2}^n i_{3mn} \text{ — соответст-}$$

венно суммарные составляющие тока, стекающего в землю и текущего по концевому участку троса линии  $L_1$ , обусловленные наличием сопротивлений  $z_m$  в схеме замещения СТО.

Как видно из приведенных формул,  $I_3$  является функцией  $r_p$ . Значение  $r_p$  в расчетах РУ высокого напряжения по допустимому напряжению прикосновения является величиной, определяемой в процессе этого расчета, причем зависимой от  $I_3$ , т. е. расчетные значения  $I_3$  и  $r_p$  — величины взаимозависимые. Поэтому расчет заземлителя РУ по допустимому напряжению прикосновения может быть произведен методом последовательных приближений, что с помощью ЦВМ легко выполнимо.

**Пример.** Двухцепная ВЛ 110 кВ ( $l=6$  км;  $l_{pr}=0,15$  км;  $r_0=10$  Ом, расстояние между ГТ и проводом фазы  $A$  линии  $a_{pl.t.a}=8,9$  м) питает тупиковую подстанцию (нейтраль трансформаторов изолирована;  $r_p=0,5$  Ом). Удельное сопротивление грунта  $\rho=100$  Ом·м. Требуется определить ток, стекающий в землю при однофазном к. з. фазы  $A$  РУ 110 кВ при использовании в качестве грозозащитного троса (трос присоединяется к ЗУ подстанции и заземлен на всех линейных опорах):

- а) стального каната ТК-70 ( $R=0,0055$  м;  $r_t=1,92$  Ом/км);
- б) сталеалюминиевого провода АС-95/16 ( $R=0,0072$  м;  $r_t=0,3$  Ом/км).

Расчетное значение тока однофазного к. з. в РУ 110 кВ подстанции для случая а) составляет 7,6 кА, а для случая б) — 8,2 кА.

#### 1. Грозозащитный трос — стальной канат ТК-70.

$$z'_t = \left( 1,92 + j \cdot 0,145 \lg \frac{93,5 \sqrt{100}}{0,95 \cdot 0,0055} \right) 0,15 = \\ = (0,288 + j \cdot 0,114) \text{ Ом;}$$

$$x_{pl.t} = 0,145 \cdot 0,15 \lg \frac{93,5 \sqrt{100}}{8,9} = 0,044 \text{ Ом.}$$

$$\text{Количество пролетов } m = \frac{6}{0,15} = 40 > \frac{4,2 \sqrt{r_0}}{\sqrt{r'_t + |z'_t|}} = 17,2;$$

$$z_{bx} \approx z_c = \sqrt{10(0,288 + j \cdot 0,114)} = (1,76 + j \cdot 0,33) \text{ Ом;}$$

$$i'_{t1} = 7,6 - 7,6 \frac{j \cdot 0,044}{0,288 + j \cdot 0,114} = (7,2 - j \cdot 1) \text{ кА;}$$

$$i''_{t1} = - \frac{0,5(7,2 - j \cdot 1)}{1,76 + j \cdot 0,33 + 0,5} = -(1,51 - j \cdot 0,44) \text{ кА.}$$

В связи с большим значением  $m$  составляющими  $i'''_{t1}$  и  $i'''_{t1c}$  можно пренебречь, тогда

$$I_{3.c} = 7,2 - j \cdot 1 - 1,51 + j \cdot 0,44 \approx 5,7 \text{ кА.}$$

Примерно такой же результат получается и при пренебрежении индуктивной составляющей сопротивления троса и со противлением взаимоиндукции между линейными проводами и тросом.

2. Грозозащитный трос — сталеалюминиевый провод АС-95/16.

$$z'_t = \left( 0,3 + j \cdot 0,145 \lg \frac{93,5 \sqrt{100}}{0,95 \cdot 0,0072} \right) 0,15 = (0,045 + j \cdot 0,112) \text{ Ом}$$

$$x_{pl.t} = 0,044 \text{ Ом; } m = 40 > \frac{4,2 \sqrt{r_0}}{\sqrt{r'_t + |z'_t|}} = 32,7;$$

$$z_{bx} \approx z_c = \sqrt{10(0,045 + j \cdot 0,112)} = (0,91 + j \cdot 0,615) \text{ Ом;}$$

$$i'_{t1} = 8,2 - 8,2 \frac{j \cdot 0,044}{0,045 + j \cdot 0,112} = (5,45 - j \cdot 1,11) \text{ кА;}$$

$$i''_{t1} = - \frac{0,5(5,45 - j \cdot 1,11)}{0,91 + j \cdot 0,615 + 0,5} = -(1,52 - j \cdot 1,06) \text{ кА;}$$

$$I_{3.a} = 5,45 - j \cdot 1,11 - 1,52 + j \cdot 1,06 \approx 3,93 \text{ кА;}$$

$$\frac{I_{3.c}}{I_{3.a}} = \frac{5,7}{3,93} = 1,45.$$

**Выводы.** 1. Расчеты, выполненные по описанной методике для конкретных подстанций 110 кВ и выше, показывают, что при присоединении к заземлению распредел устройства высокого напряжения сталеалюминиевых грозозащитных тросов частного тока однофазного короткого замыкания, стекающего с заземляющим устройством, значительно меньше, чем при присоединении стального троса, несмотря на некоторое увеличение тока однофазного к. з. (сопротивление нулевой последовательности линии со сталеалюминиевым тросом ниже, чем со стальным). При уменьшении тока, стекающего в землю с заземляющим устройством, уменьшается и прямо пропорциональное ему напряжение прикосновения, что очень важно для безопасного обслуживания высоковольтных электроустановок. Таким образом, для постаний 110 кВ и выше небольшой площади и с высоким удельным сопротивлением грунта, где испытываются трудности выполнением заземляющего устройства, может быть рекомендовано выполнять подходы ВЛ к подстанции со сталеалюминиевыми тросами.

2. Применение сталеалюминиевого провода, если его включение в качестве грозозащитного троса не приведет к увеличению числа опор на ВЛ, может оказаться и экономически более выгодным, так как уменьшение тока, стекающего в землю с заземляющим устройством, позволяет увеличить шаг ячеек контура заземления, рассчитываемого по допустимому напряжению прикосновения.

#### Список литературы

1. Правила устройства электроустановок. — М.-Л.: Энергия, 1976.
2. Найфельд М. Р. Заземления, защитные меры электробезопасности. — М.: Энергия, 1971.
3. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы. — М.: Энергия, 1970.
4. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. — М.: Наука, 1977.

# Метод многовариантного анализа нелинейных электронных схем

КУРГАНОВ С. А., ФИЛАРЕТОВ В. В.

Ульяновск

Используемые в настоящее время блоки анализа электронных схем, основанные на методах независимых величин [1], не всегда обеспечивают желаемые результаты с точки зрения вычислительных затрат при многократном анализе даже линейных схем [2]. Применение численно-символических алгоритмов, позволяющих построить буквенно-численные математические модели (БЧММ) схем, как показывает практика, более подходит для многовариантного анализа [2], несмотря на громоздкость БЧММ и трудоемкость их получения. Это связано с тем, что БЧММ, построенная символическим алгоритмом один раз для схемы данной структуры, может затем многократно использоваться в процессе оптимизации. Численные же алгоритмы формируют математическую модель заново на каждом варианте анализа.

Возможность многовариантного анализа схемы имеет особую ценность при расчете нелинейных цепей, поскольку в связи с использованием в этом случае методов итераций и конечных приращений значительно повышается кратность формирования модели цепи. Однако топологические методы, на которых базируются символические алгоритмы, разработаны только для линейных электронных схем.

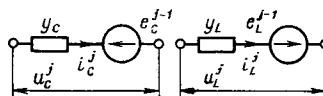
Настоящая статья как раз и показывает возможность адаптации топологических методов построения БЧММ к анализу статического и динамического режимов нелинейных схем. Предлагается один из путей организации блоков анализа, допускающих эффективную параметрическую оптимизацию.

Метод предполагает запись конечной системы нелинейных алгебраических уравнений относительно передаточных функций в виде БЧММ на каждом временном шаге, причем построение системы для конкретной схемы осуществляется один раз. Реактивные компоненты входят в систему в виде соответствующих моделей замещения [3], т. е. в сущности такая система будет отображать неявный метод численного интегрирования на базе БЧММ, построенных топологическими методами. Данная система уравнений сохранит достоинства традиционных БЧММ линейных цепей, поскольку она будет обладать структурой неизменной как в процессе следующего шага интегрирования, так и при параметрической оптимизации в целом.

Покажем реализацию такой модели на примере электронной схемы, содержащей  $n$  нелинейных резистивных ветвей, характеризуемых статическими проводимостями вида  $q_N = f(u_N)$ , где  $u_N$  — напряжение на элементе, и следующие линейные компоненты:  $k$  индуктивностей,  $m$  емкостей,  $p$  независимых источников э. д. с. Форма и размерность математической модели схемы, представленной в статье, не зависит от числа линейных резистивных элементов и линейных зависимых источников, поэтому их количество не указывается.

Положим, что в процессе оптимизации схемы изменяются (варьируются) параметры  $q$  линейных резистивных элементов. В общем случае варьируемыми параметрами могут быть характеристики любых из указанных выше компонентов. В качестве итерационных схем замещения реактивных элементов, реализующих неявный метод интегрирования, будут использоваться модели по Эйлеру [3], изображенные на рис. 1. Для постановки метода можно применять и другие итерационные схемы замещения.

Для сохранения компактности записи системы в методе применяется представление всех независимых источников, кроме одного выбранного определяющим, в виде эквивалентных ста-



ис. 1. Итерационные схемы замещения емкости и индуктивности.  $i_C$ ,  $i_L$  — токи емкости и индуктивности;  $u_C$ ,  $u_L$  — соответствующие напряжения;  $e_C$ ,  $e_L$  — э. д. с. источников замещения; проводимости  $y_C = C/\Delta t$ ,  $y_L = \Delta t/L$ ;  $e_L^j = u_L^{j-1}$ ,  $e_C^j = u_C^{j-1}$  (наличие верхнего индекса у величины означает ее принадлежность к определенному временному шагу)

тических проводимостей замещения, меняющих свои значения при изменении тока или напряжения. Проводимость замещения  $y_e$  источника э. д. с.  $e$  в общем случае может быть найдена из соотношения:

$$i_e = y_e e, \quad (1)$$

где  $i_e$  — ток через источник.

Используя вышеизложенные положения, запишем для данной цепи систему матричных уравнений относительно передаточных функций по напряжению в виде БЧММ:

$$U_N^j = K_N (Y_B, Y_N (U_N^j), Y_E^j, Y_{EC}^j, Y_{EL}^j) e_1^j = 0; \quad (2)$$

$$E^j - K_E (Y_B, Y_N (U_N^j), Y_E^j, Y_{EC}^j, Y_{EL}^j) e_1^j = 0; \quad (3)$$

$$(Y_{EC}^j + Y_C) \square E_C^{j-1} - \\ - K_{EC} (Y_B, Y_N (U_N^j), Y_E^j, Y_{EC}^j, Y_{EL}^j) \square Y_C e_1^j = 0; \quad (4)$$

$$(Y_{EL}^j - Y_L) \square E_L^{j-1} - \\ - K_{EL} (Y_B, Y_N (U_N^j), Y_E^j, Y_{EC}^j, Y_{EL}^j) \square Y_L e_1^j = 0; \quad (5)$$

$$E_C^j = \frac{Y_{EC}^j + Y_C}{Y_C} \square E_C^{j-1}; \quad (6)$$

$$E_L^j = \frac{Y_{EL}^j + Y_L}{Y_L} \square E_L^{j-1}, \quad (7)$$

где прописные буквы обозначают векторы, а соответствующие им строчные — скалярные величины; операции над вектором одной размерности  $A = [a_i]$ ,  $B = [b_i]$ ,  $D = [d_i]$ ,  $G = [g_i]$  вида  $D = A \square B$ ,  $G = \frac{A}{B}$  означают соответственно  $d_i = a_i b_i$ ;  $g_i = a_i / b_i$ ; все остальные операции известны из матричной алгебры; индексы  $j$  и  $(j-1)$  относят данную величину к соответствующему временному шагу;  $e_1$  — э. д. с. независимого источника цепи, выбранного в качестве определяющего;  $E = [e_2, e_3, \dots, e_p]$  — вектор напряжений остальных независимых источников э. д. с. цепи, размерность  $(p-1)$ ;  $\square$  — знак транспонирования;  $E_C$ ,  $E_L$  — векторы напряжений источников э. д. с. схем замещения соответственно емкостей и индуктивностей, размерности  $m$  и  $k$ ;  $U_N$  — вектор напряжений на нелинейных резистивных элементах размерностью  $n$ ;  $K_N$  — вектор коэффициентов передачи по напряжению с определяющим источником э. д. с.  $e_1$  на нелинейные резисторы, размерность  $n$ ;  $K_E$  — вектор коэффициентов передачи по напряжению с источником  $e_1$  на источники э. д. с. цепи  $E$ , размерность  $(p-1)$ ;  $K_{EC}$ ,  $K_{EL}$  — векторы коэффициентов передачи по напряжению с источником  $e_1$  на источники э. д. с. цепи, размерности  $m$  и  $k$ ;  $Y_B$  — вектор варьируемых проводимостей, размерность  $q$ ;  $Y_N (U_N)$  — вектор статических проводимостей нелинейных резистивных элементов, размерность  $n$ ;  $Y_{EC}$ ,  $Y_{EL}$  — векторы эквивалентных проводимостей, замещающих источники э. д. с. итерационных схем замещения емкостей и индуктивностей соответственно, размерности  $m$  и  $k$ ;  $Y_C = [C_1/\Delta t, C_2/\Delta t, \dots, C_m/\Delta t]^T$ ,  $Y_L = [\Delta t/L_1, \Delta t/L_2, \dots, \Delta t/L_k]^T$  — векторы проводимостей итерационных схем замещения емкостей и индуктивностей соответственно (рис. 1);  $[C_1, C_2, \dots, C_m]^T$ ,  $[L_1, L_2, \dots, L_k]^T$  — векторы численных значений емкостей и индуктивностей соответственно;  $\Delta t$  — временной интервал алгебраизации.

Матричное уравнение (2) связывает напряжения, с одной стороны, на определяющем источнике и, с другой стороны, — на всех нелинейных резистивных компонентах. Уравнение (3) определяет зависимость между напряжениями на определяющем источнике и на всех остальных источниках э. д. с. цепи. Таким путем реализуется замена источников э. д. с. эквивалентными проводимостями замещения на каждом временном шаге в процессе однократного решения системы (2)–(5). Это необходимо для

минимизации числа требуемых коэффициентов передачи в виде БЧММ. Без использования уравнения (3) потребовалось добавить к системе  $(m+n+k)(p-1)$  уравнений, содержащих БЧММ, вместо  $(p-1)$  как в данном случае. Такая замена независимых источников эквивалентными проводимостями реализует неявный принцип суперпозиции.

Уравнения (4), (5) аналогичны по содержанию (2), (3) и отображают связи источника  $e_1$  и источников схем замещения емкостей и индуктивностей соответственно на временном шаге  $j$ , причем напряжения источников на шаге  $j$  определены через значения этих источников на  $(j-1)$ -м шаге на основе уравнений (6) и (7). Последние получены на основе (1) и формул схем замещения  $C$  и  $L$ .

Рассмотрим алгоритм решения (2)–(7). Система в процессе последовательного решения реализует интегрирование дифференциальных уравнений, отображающих электрическую цепь, неявным методом Эйлера. Для инициализации вычислительного процесса должны быть заданы начальные значения векторов  $E_C$  и  $E_L$ , первый из которых определяет начальное состояние цепи, второй определяется по известному вектору исходных токов  $I_L$  индуктивностей:  $E_L = Y_L \square I_L$ . Если же интегрирование ведется исходя из статического режима схемы, начальные значения векторов  $E_C$  и  $E_L$  могут быть найдены предложенным методом. В этом случае модель цепи будет включать только уравнения (2) и (3).

Решение на временном шаге  $j$  системы (2)–(7) производится в два этапа. Сначала решаются совместно уравнения (2)–(5) относительно четырех неизвестных векторов  $U_N^j$ ,  $Y_E^j$ ,  $Y_{EC}^j$ ,  $Y_{EL}^j$ . Для этого в систему вводятся значения вектора независимых источников цепи  $E^j$ , определяющего источника  $e_1^j$ , векторов источников схем замещения на временном шаге  $(j-1) - E_C^{j-1}$ ,  $E_L^{j-1}$ , векторов варьируемых параметров, соответствующих текущему варианту анализа. Величины векторов  $Y_C$ ,  $Y_L$  вводятся в численном виде при формировании системы (2)–(7).

Решение системы нелинейных алгебраических уравнений (2)–(5) можно производить любым неявным итерационным методом, например Ньютона–Рафсона [4]. В последнем требуется вычисление якобиана на каждой итерации. В отличие от численных матричных методов это не вносит дополнительных осложнений: якобиан, как и сама система (2)–(7), составляется один раз в аналитической форме и в дальнейшем используется в процессе многократного анализа в виде шаблона. Начальные приближения для векторов  $U_N$ ,  $Y_E$ ,  $Y_{EC}$ ,  $Y_{EL}$  выбираются в соответствии с рекомендациями [3 и 4]. Результатом решения системы (2)–(5) на временном шаге  $j$  являются векторы  $U_N^j$ ,  $Y_E^j$ ,  $Y_{EC}^j$ ,  $Y_{EL}^j$ .

Второй этап решения системы (2)–(7) на временном шаге  $j$  заключается в определении векторов  $E_C^j$ ,  $E_L^j$  путем подстановки значений векторов  $Y_{EC}^j$ ,  $Y_{EL}^j$ ,  $E_C^{j-1}$ ,  $E_L^{j-1}$  в выражения (6) и (7). Полученные векторы  $E_C^j$ ,  $E_L^j$  используются при решении системы (2)–(5) на временном шаге  $(j+1)$ .

Указанные этапы решения повторяются число раз, равное числу шагов временного анализа. Далее этот процесс может повторяться число раз, равное количеству вариантов анализа.

Остановимся на особенностях формирования БЧММ для метода. Коэффициенты передачи в буквенно-численном виде, относительно которых составляются уравнения (2)–(5), могут быть получены любым известным топологическим методом [1 и 2]. В данном случае в отличие от [2] алгоритм будет работать с вещественными числами и поэтому БЧММ будут проще, чем в определенной мере скомпенсируют дополнительные затраты, возникающие при формировании и использовании БЧММ нелинейных схем по сравнению с линейными. При выборе типа схемных функций следует ориентироваться на коэффициенты передачи по напряжению, которые обеспечивают наибольшую компактность программной реализации.

Рассмотрим пример формирования БЧММ электронной цепи (рис. 2). Схема замещения, полученная с использованием модели транзистора [3 и 4], представлена на рис. 3. Компонентные уравнения для схемы имеют вид:

$$f_1(u) = I_{01} [\exp(u_{n1}/\Phi_T) - 1];$$

$$f_2(u) = I_{02} [\exp(u_{n2}/\Phi_T) - 1];$$

$$e_S(u) = I_0 R_{3-K} [\exp(u_{n1}/\Phi_T) - \exp(u_{n2}/\Phi_T)].$$

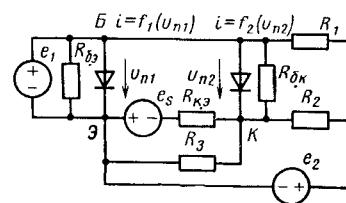
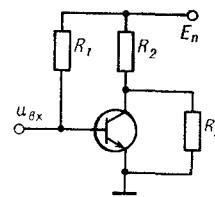


Рис. 2. Электронная цепь для иллюстрации метода

Рис. 3. Схема замещения

Модель цепи по методу многовариантного анализа должна содержать четыре уравнения (отметим, что зависимый источник в данном случае учитывается аналогично независимым):

$$u_{n1} - k_{n1} e_1 = 0; \quad (8)$$

$$u_{n2} - k_{n2} e_1 = 0; \quad (9)$$

$$e_2 - k_e e_1 = 0; \quad (10)$$

$$e_S(u_{n1}, u_{n2}) - k_{eS} e_1 = 0. \quad (11)$$

Сформируем необходимые коэффициенты передачи по напряжению:

$$k_{n1} = 1;$$

$$g_1 y_{eS} f_2(u_{n2}) u_{n1} + y_e y_{eS} f_2(u_{n2}) u_{n1} + b_1 y_e f_2(u_{n2}) u_{n1} + \\ + b_1 y_e y_{eS} u_{n1} u_{n2} + b_2 g_1 f_2(u_{n2}) u_{n1} + b_2 g_1 y_{eS} + \\ + b_3 y_e S f_2(u_{n2}) u_{n1} + b_4 f_2(u_{n2}) u_{n1};$$

$$k_{n2} = \frac{S}{g_1 y_{eS} f_2(u_{n2}) u_{n1} + b_1 g_1 f_2(u_{n2}) u_{n1} + b_2 g_1 y_{eS} + b_3 y_e S f_2(u_{n2}) u_{n1} + b_4 f_2(u_{n2}) u_{n1}},$$

$$g_1 y_e f_2(u_{n2}) u_{n1} + b_1 g_1 f_2(u_{n2}) u_{n1} + b_2 g_1 y_{eS} u_{n1} u_{n2} + a_2 f_2(u_{n2}) u_{n1} + a_2 y_e u_{n1} u_{n2} + \\ + b_3 f_1(u_{n1}) f_2(u_{n2}) + b_3 y_e f_1(u_{n1}) u_{n2};$$

$$k_e = \frac{S}{g_1 y_{eS} f_2(u_{n2}) u_{n1} + y_e y_{eS} f_1(u_{n1}) u_{n2} + a_1 g_1 f_2(u_{n2}) u_{n1} + \\ + a_2 f_2(u_{n2}) u_{n1} + b_5 y_e f_2(u_{n2}) u_{n1}};$$

$$S = g_1 y_{eS} f_2(u_{n2}) u_{n1} + y_e y_{eS} f_2(u_{n1}) u_{n2} + y_e y_{eS} f_2(u_{n2}) u_{n1} + \\ + b_1 y_e f_2(u_{n2}) u_{n1} + b_1 y_e y_{eS} u_{n1} u_{n2} + y_e f_1(u_{n1}) f_2(u_{n2}).$$

Численные коэффициенты модели имеют значения:

$$a_1 = g_2 + g_5; \quad a_2 = g_2 g_5; \quad a_3 = g_2; \quad a_4 = g_5;$$

$$b_1 = g_2 + g_3; \quad b_2 = g_3; \quad b_3 = g_2; \quad b_4 = g_2 g_3; \quad b_5 = g_5.$$

Уравнения (8)–(11) решаются совместно относительно четырех неизвестных  $(u_{n1}, u_{n2}, y_e, y_{eS})$  для каждого момента времени анализа цепи.

Предложенный метод анализа статического и динамического режимов электронных схем может быть достаточно просто formalизован и использован для решения задач на ЦВМ. Эффективность практического применения метода зависит, прежде всего от возможностей используемых блоков топологического анализа. Допустимая сложность анализируемых схем при современных топологических алгоритмах составляет 10–15 узлов и 20–30 элементов.

#### Список литературы

1. Максимович Н. Г. Методы топологического анализа электрических цепей.—Львов: Изд. Львов. ун-та, 1970.
2. Машинная оптимизация электронных узлов РЭА/Ларин А. Г., Томашевский Д. И., Шумков Ю. М., Эйдельхант В. М.—М.: Советское радио, 1978.
3. Ильин В. Н. Основы автоматизации схемотехнического проектирования.—М.: Энергия, 1979.
4. Чуя Л. О., Лин П. М. Машинный анализ электронных схем/Пер. с англ. под. ред. В. Н. Ильина.—М.: Энергия, 1980

# Исследование резонансно-параметрического измерительного преобразователя сдвига фаз

ЛОКАРЕВ В. И., канд. техн. наук  
Николаевский кораблестроительный институт

Одной из важнейших задач современной фазометрии является измерение начальных фазовых сдвигов синусоидальных напряжений кратных частот [1]. Перспективным для решения этой задачи представляется использование резонансно-параметрического элемента (РПЭ), который является многофункциональным измерительным преобразователем [2]. В [3] рассмотрены свойства РПЭ как измерительного преобразователя частоты. При соответствующем изменении схемы подключения он может выполнять фазовые измерения. Как и в случае измерения частоты, основной измерительный орган РПЭ, параметрический усилитель, работает в синхронном режиме. Обеспечивается этот режим с помощью преобразователей частоты в четное число раз, делителей или умножителей.

Резонансно-параметрический элемент в общем случае позволяет измерять сдвиг между сигналами равных и кратных частот, связанных зависимостью  $f_2/f_1=2^n$ , где  $n=0, 1, 2, 3 \dots$

При разных соотношениях частот изменяется вид преобразователя частоты и место его включения. Так, при измерении сдвига фаз напряжений равных частот ( $n=0$ ) используется делитель частоты ДЧ два раза включаемый в цепь входного сигнала (рис. 1, а). Возможен также вариант с удвоителем частоты УЧ, который включается в цепь модуляции (рис. 1, б).

Если частоты отличаются в два раза ( $n=1$ ), необходимость в преобразователе частоты отпадает. Напряжения подаются на параметрический усилитель ПУ непосредственно, напряжение меньшей частоты — в цепь входного сигнала, сигнал большей частоты — в цепь модуляции (рис. 1, в).

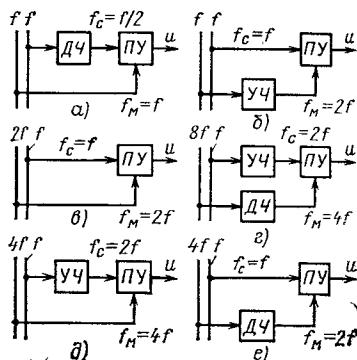


Рис. 1

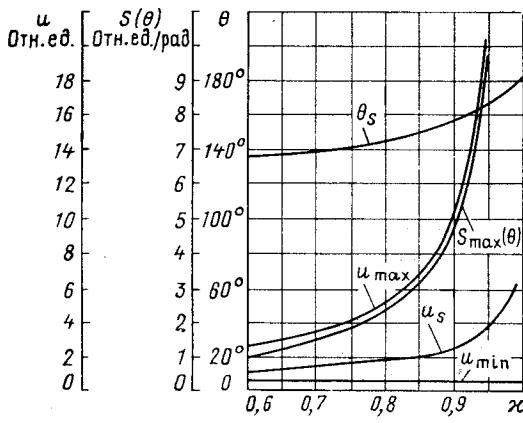


Рис. 2

При соотношении частот, равном четырем ( $n=2$ ), может быть использована схема с УЧ в цепи входного сигнала (рис. 1, д) или схема с ДЧ в цепи модуляции (рис. 1, е). При частотах, отличающихся в 8 раз ( $n=3$ ), в цепь сигнала включается УЧ, в цепь модуляции — ДЧ (рис. 1, г).

На схемах рис. 1 не показаны фазоповоротные элементы, необходимые для первоначальной настройки и компенсации фазовых погрешностей, которые можно включать в любую из входных цепей ПУ. Напряжение  $u$  на выходе ПУ, построенного на параллельном колебательном контуре,

$$u(\theta, \Psi_c) = \frac{\sqrt{1 + \chi^2 + 4Q^2\Psi_c^2 + 2\chi \cos \theta - 4\chi Q\Psi_c \sin \theta}}{1 - \chi^2 + 4Q^2\Psi_c^2}. \quad (1)$$

Величины, входящие в это выражение, указаны в [3].

Проходную характеристику измерительного преобразователя сдвига фаз вначале рассмотрим при условии идеальной настройки контура по частоте ( $\Psi_c = 0$ ). Выражение (1) при этом преобразуется:

$$u(\theta) = \frac{\sqrt{1 + \chi^2 + 2\chi \cos \theta}}{1 - \chi^2}. \quad (2)$$

Экстремальные значения функции  $u(\theta)$  могут быть получены из условия  $2\chi \sin \theta = 0$ . Максимальное выходное напряжение  $u_{\max} = 1/(1-\chi)$  соответствует углу  $\theta_u = 0$ , минимальное  $u_{\min} = 1/(1+\chi)$  будет при  $\theta_u = \pi$ .

Чувствительность преобразователя к углу  $\theta$  при идеальной настройке контура

$$S(\theta) = \frac{\partial u}{\partial \theta} = \frac{-\chi \sin \theta}{(1-\chi^2)\sqrt{1+\chi^2+2\chi \cos \theta}}. \quad (3)$$

Максимальная чувствительность преобразователя, а также соответствующие ей значения обобщенного угла и напряжения могут быть определены с помощью зависимостей:

$$S_{\max} = \frac{-\chi}{1-\chi^2}; \quad (4)$$

$$\theta_s = \arccos(-\chi); \quad (5)$$

$$u_s = \frac{1}{\sqrt{1-\chi^2}}. \quad (6)$$

Выражения (5) и (6) получены из условия  $\partial^2 u / \partial \theta^2 = 0$ .

Из графиков, построенных на рис. 2 по выражениям (4), (5), (6), видно, что максимальные значения относительного выходного напряжения  $u_{\max}$  чувствительности  $S_{\max}$  в значительной степени зависят от параметра  $\chi$ . Особенно сильной эта зависимость становится в интервале  $0,9 > \chi > 1$ . Отсюда следует, что для получения возможно больших значений  $u$  и  $S$  величину  $\chi$  нужно принимать близкой к единице. Вместе с тем следует помнить, что при  $\chi=1$  контур возбуждается, теряя необходимые измерительные свойства. По этой причине  $\chi$  следует выбирать менее 0,95.

Рассмотренные зависимости соответствуют идеальной настройке контура по частоте. Реальным случаем является наличие некоторой частотной расстройки.

Анализ зависимостей  $u(\theta)$ , полученных по (1), показывает, что расстройка  $\Psi_c$  снижает выходные напряжения. Кроме того, она вызывает сдвиг кривой  $u(\theta)$  вдоль горизонтальной прямой на угол  $\theta_u = \arctg(-2Q\Psi_c)$  влево или вправо, в зависимости от знака расстройки. Наглядно это видно из графиков  $u(\theta)$ , построенных на рис. 3 для случаев  $\Psi_c=0$ ,  $\Psi_c=\pm 0,02$  и  $\Psi_c=\pm 0,05$ .

Максимальное значение выходного напряжения (соответствует углу  $\theta = \theta_u = \arctg(-2Q\Psi_c)$ ):

$$u_{\max} = \frac{\sqrt{1 + 4Q^2\Psi_c^2 + \chi}}{1 - \chi^2 + 4Q^2\Psi_c^2}. \quad (7)$$

Минимальное значение  $u$  будет при  $\theta = \theta_u + \pi$ :

$$u_{\min} = \frac{\chi - \sqrt{1 + 4Q^2 \Psi_c^2}}{1 - \chi^2 + 4Q^2 \Psi_c^2}. \quad (8)$$

Выражение для чувствительности  $S(\theta)$  с учетом частотной расстройки получим, продифференцировав выражение (1):

$$S(\theta) = \frac{\partial u}{\partial \theta} = -b \frac{\chi \sin \theta + 2\chi Q \Psi_c \cos \theta}{\sqrt{a + 2\chi \cos \theta - 4\chi \theta \Psi_c \sin \theta}}, \quad (9)$$

где

$$a = 1 + \chi^2 + 4Q^2 \Psi_c^2,$$

$$b = \frac{1}{1 - \chi^2 + 4Q^2 \Psi_c^2}.$$

Из сопоставления (3) и (9) видно, что расстройка по частоте существенно снижает чувствительность  $S(\theta)$ . Наглядно это показано на графиках рис. 4.

Рассмотренные зависимости — обобщенные, характеризуют фазовые свойства параметрического усилителя и не учитывают конкретную схему реализации измерительного преобразователя в целом.

Рассмотрим теперь характеристики преобразователя с учетом вида преобразования частоты, принятого при его построении, ограничившись случаем измерения фазовых сдвигов напряжений, частоты которых одинаковы (схемы рис. 1, а и б). При этом примем условие точной настройки контура по частоте, а зависимость  $u(\theta)$  упростим, приведя ее к виду, при котором выводы становятся более наглядными. Такое упрощение оправдано, если учтет качественный характер получаемых при этом результатов.

Выражение (2) запишем в виде:

$$u(\theta) = \frac{\sqrt{(1-\chi)^2 + 2\chi(1+\cos\theta)}}{1-\chi^2}. \quad (10)$$

Если  $\chi$  близка к единице, то первым слагаемым подкоренного выражения можно пренебречь.

Тогда

$$u(\theta) = \frac{2\sqrt{\chi}}{1-\chi^2} \sqrt{\frac{1+\cos\theta}{2}} = \frac{2\sqrt{\chi}}{1+\chi} \frac{1}{1-\chi} \cos\theta/2. \quad (11)$$

Соотношение  $\frac{2\sqrt{\chi}}{(1+\chi)}$  при  $\chi$ , близком к 1, также мало отличается от 1. Так, при  $\chi = 0,8$  оно равно 0,9939, при  $\chi = 0,9 - 0,9986$  и 0,9997 при  $\chi = 0,95$ . Таким образом, приняв

$$\frac{2\sqrt{\chi}}{(1+\chi)} = 1, \text{ получим}$$

$$u(\theta) = \frac{1}{1-\chi} \cos\theta/2. \quad (12)$$

Пусть напряжение и ток, сдвиг фаз между которыми изменяется с помощью рассматриваемого преобразователя, имеют начальные сдвиги — фазы  $\Phi_u$  и  $\Phi_i$ .

Если использовать схему с делителем частоты (рис. 1, а) и ток подать в цепь входного сигнала, а напряжение — в цепь модуляции, то обобщенный угол

$$\theta = \Phi_m - 2\Phi_c - \pi/2 = \Phi_u + \Phi_f + \Phi_{id} - \Phi_i - \Phi_{id} - \pi/2, \quad (13)$$

где  $\Phi_f$  — угловой сдвиг, вносимый фазоповоротным устройством;  $\Phi_{id}$ ,  $\Phi_i$  — дополнительные фазовые сдвиги, сопровождающие преобразования напряжения и тока.

Если сдвиг фазоповоротного устройства

$$\Phi_f = \Phi_{id} - \Phi_i + \pi/2, \quad (14)$$

получим

$$\theta = \Phi_u - \Phi_i = \Psi, \quad (15)$$

где  $\Psi$  — измеряемый угол сдвига фаз.

Подставив в (12) значение угла  $\theta$  из выражения (15), и перейдя при этом от тока входной цепи ПУ к измеряемому току  $I$ ,

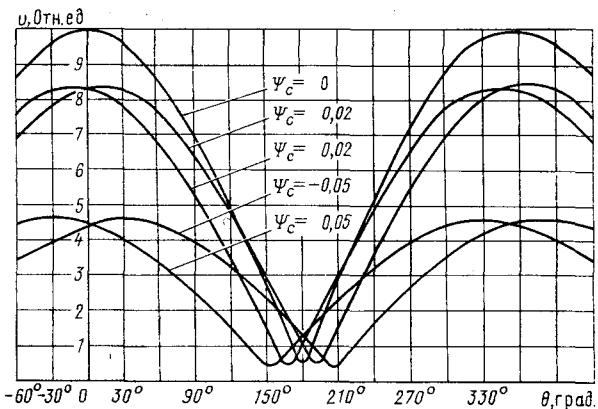


Рис. 3

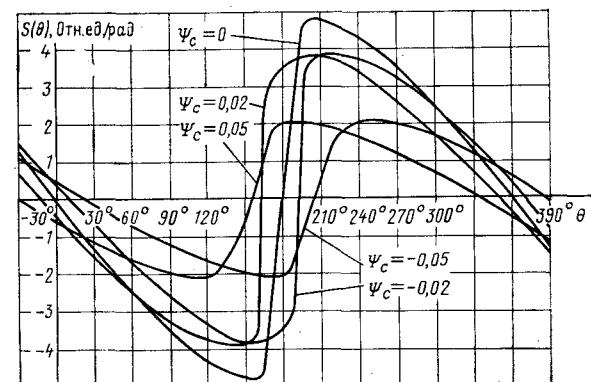


Рис. 4

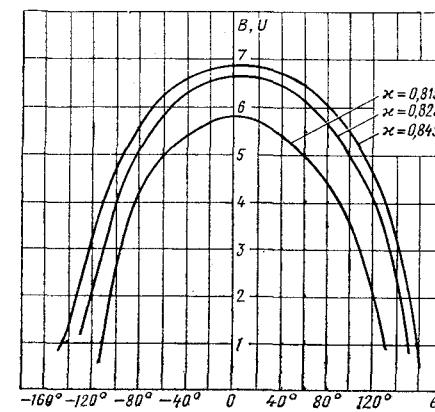


Рис. 5

от относительного напряжения к абсолютному, получим

$$U(\theta) = \frac{k_I k_D}{G(1-\chi)} I \cos \Psi/2, \quad (16)$$

где  $k_I$ ,  $k_D$  — коэффициенты преобразования трансформатора то и делителя частоты.

Как следует из (16), при  $\Psi = 0$  выходное напряжение преобразователя

$$U = \frac{k_I k_D}{G(1-\chi)} I = U_{max}, \quad (17)$$

а при  $\theta = \pi$  оно равно нулю.

Таким образом, выходное напряжение фазоизмерительного преобразователя с делителем частоты принимает нулевое значение при прямом активном токе и максимальное — при обратном активном токе. Это соответствует условиям работы реле обратного тока.

Для схемы с удвоителем частоты (рис. 1, б) обобщенный угол

$$\theta = 2(\varphi_u + \varphi_\Phi) + \varphi_{id} - 2\varphi_i - 2\varphi_{id} - \pi/2. \quad (18)$$

Если взять

$$\varphi_\Phi = \varphi_{id} - 1/2\varphi_{id} + \pi/4, \quad (19)$$

этому углу будет соответствовать

$$\theta = 2\Psi, \quad (20)$$

а выходное напряжение измерительного преобразователя

$$U = \frac{k_I k_d}{G(1-\chi)} I \cos \Psi. \quad (21)$$

При угле сдвига фазоповоротного устройства

$$\varphi_\Phi = \varphi_{id} - 1/2\varphi_{id} + 3/4\pi$$

обобщенный угол  $\theta = 2\Psi + \pi$ , и напряжение на выходе преобразователя

$$U = \frac{k_I k_d}{G(1-\chi)} I \sin \Psi. \quad (22)$$

Как видно из (21) и (22), выходное напряжение преобразователя с удвоителем частоты в зависимости от угла, вносимого

фазоповоротным устройством, пропорционально  $I \cos \theta$  или  $I \sin \theta$ . Первый случай соответствует измерению активного тока, второй — реактивного. Переход от одного режима измерения к другому осуществляется изменением сдвига фазоповоротного устройства на  $\pi/2$ .

Проходные характеристики измерительного преобразователя сдвига фаз, снятые экспериментально, показаны на рис. 5. Они получены с помощью той же схемы, что и преобразователь частоты, исследованный в [3].

Таким образом РПЭ, кроме измерения частоты может выполнять функции измерительного преобразователя сдвига фаз электрических сигналов. В зависимости от соотношения частот, схема РПЭ, кроме параметрического усилителя ПУ, содержит делитель или умножитель частоты. Одна из основных погрешностей измерения сдвига фаз с помощью РПЭ обусловлена частотной расстройкой, вызванной изменением параметров контура.

### Список литературы

- Галахова О. П., Колтик Е. Д., Кравченко С. А. Основы фазометрии. — Л.: Энергия, Ленинград, отд-ние, 1976.
- Локарев В. И. Многофункциональный измерительный орган на параметрических колебательных контурах. — Изв. вузов. Приборостроение, 1979, т. XXII, № 4.
- Локарев В. И. Исследование резонансно-параметрического измерительного преобразователя частоты. — Электричество, 1981, № 2.
- Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. — М.: Советское радио, 1966.

{10.06.82}

УДК 621.396.001.24

## Об эквивалентном преобразовании сложной магнитной цепи с контурами электрической связи

ЮДИН В. В., канд. техн. наук

Рыбинский авиационный технологический институт

Взаимное преобразование электромагнитных цепей находит широкое применение в практике их анализа и синтеза [1 и 2]. Целью предлагаемой статьи является установление правил преобразования сложной электромагнитной цепи с контурами электрической связи между стержнями магнитопровода к эквивалентной магнитной цепи.

Рассмотрим электромагнитную цепь (рис. 1), содержащую магнитопровод произвольной конфигурации  $A$ . Отдельные стержни магнитопровода ( $k$ - и  $q$ -й) связаны системой из  $r$  электрических контуров, образованных обмотками  $w_{k,1}, \dots, w_{k,r}, w_{q,1}, \dots, w_{q,r}$  и двухполюсниками  $F_1, \dots, F_r$ . Кроме того,  $k$ -й стержень включен дополнительно в  $s$  контуров, образованных обмотками  $w_{k,r+1}, \dots, w_{k,r+s}$  и двухполюсниками  $B_1, \dots, B_s$ , а  $q$ -й стержень — в  $d$  контуров, образованных обмотками  $w_{q,r+1}, \dots, w_{q,r+d}$  и двухполюсниками  $C_1, \dots, C_d$ . Двухполюсники в общем случае будем считать активными. В них действуют источники э. д. с. и тока.

Для дальнейших преобразований учтем, что источник тока  $I(p)$  с внутренней поверхностью  $1/g(p)$  может быть преобразован к эквивалентному источнику э. д. с.  $E(p) = I(p)g(p)$  с внутренним сопротивлением  $g(p)$ . Ненулевые начальные условия в цепи могут быть учтены введением дополнительных источников э. д. с. Так известно [1], что для тока  $I(p)$ , протекающего через участок электрической цепи  $ab$ , содержащий э. д. с.  $E(p)$  и

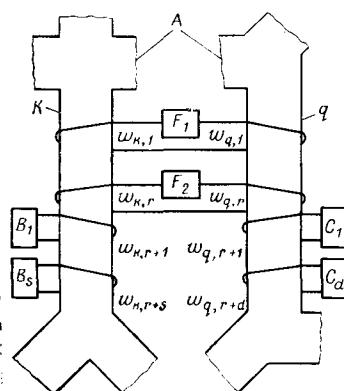


Рис. 1

сопротивление  $z(p)$ , имеет место соотношение

$$I(p) = [U_{ab}(p) + E(p) + L_I(0) - U_C(0)/p]/z(p), \quad (1)$$

где  $I(0)$  и  $U_C(0)$  — начальные условия для тока в индуктивности  $L$  и напряжения на конденсаторе  $C$ .

Представим (1) в виде

$$I(p) = \frac{U_{ab}(p) + e(p)}{z(p)}, \quad (2)$$

где

$$e(p) = E(p) + L_I(0) - U_C(0)/p. \quad (3)$$

Из (2) следует, что формально ненулевые начальные условия в электрических контурах могут быть учтены путем преобразования (3) действующей в них э. д. с.  $E(p)$  к некоторой эквивалентной э. д. с.  $e(p)$ .

Таким образом, все электрические контуры исходной электромагнитной цепи могут быть представлены в виде последовательного соединения обмотки с некоторой эквивалентной э. д. с.  $e(p)$  и эквивалентным сопротивлением  $Z(p)$ , равным сумме сопротивления контура  $z(p)$  и внутреннего сопротивления э. д. с.  $g(p)$ , т. е.

$$Z(p) = z(p) + g(p). \quad (4)$$

С учетом вышеизложенного представим исходную электромагнитную цепь в виде схемы, приведенной на рис. 2. Для каждого из электрических контуров схемы рис. 2 имеем [1]

$$\left. \begin{aligned} e_j(p) - p w_{k,j} \Phi_k(p) - p w_{q,j} \Phi_q(p) &= i_j(p) Z_j(p) \\ \text{при } j = 1, 2, \dots, r; \\ e_{k,j}(p) - p w_{k,j} \Phi_k(p) &= i_{k,j}(p) Z_{k,j}(p) \\ \text{при } j = r+1, r+2, \dots, r+s; \\ e_{q,j}(p) - p w_{q,j} \Phi_q(p) &= i_{q,j}(p) Z_{q,j}(p) \\ \text{при } j = r+1, r+2, \dots, r+d. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Решая (5) относительно токов, получаем

$$i_{k,j} = \begin{cases} \frac{1}{Z_j(p)} [e_j(p) - p w_{k,j} \Phi_k(p) - p w_{q,j} \Phi_q(p)] \\ \text{при } j = 1, 2, \dots, r \\ \frac{1}{Z_{k,j}(p)} [e_{k,j}(p) - p w_{k,j} \Phi_k(p)] \\ \text{при } j = r+1, r+2, r+s; \end{cases} \quad (6)$$

$$i_{q,j} = \begin{cases} \frac{1}{Z_j(p)} [e_j(p) - p w_{k,j} \Phi_k(p) - p w_{q,j} \Phi_q(p)] \\ \text{при } j = 1, 2, \dots, r; \\ \frac{1}{Z_{q,j}(p)} [e_{q,j}(p) - p w_{q,j} \Phi_q(p)] \\ \text{при } j = r+1, r+2, \dots, r+d. \end{cases} \quad (7)$$

Для произвольного контура магнитной цепи, включающего  $k$ -й стержень, в соответствии с законом Кирхгофа запишем

$$\sum_{j=1}^{r+s} i_{k,j}(p) w_{k,j} + \sum_{\gamma=1}^{m-1} M_{\gamma}(p) = \Phi_k(p) R_k + \sum_{\gamma=1}^{m-1} \Phi_{\gamma}(p) R_{\gamma}, \quad (8)$$

где  $m$  — число стержней в этом контуре;  $M_{\gamma}(p)$  — изображения м. д. с., действующих в стержнях контура;  $R_k$  и  $R_{\gamma}$  — магнитные сопротивления стержней.

Аналогично для произвольного контура, включающего  $q$ -й стержень, запишем

$$\sum_{j=1}^{r+d} i_{q,j}(p) w_{q,j} + \sum_{\delta=1}^{n-1} M_{\delta}(p) = \Phi_q(p) R_q + \sum_{\delta=1}^{n-1} \Phi_{\delta}(p) R_{\delta}, \quad (9)$$

где  $n$  — число стержней в контуре.

Подставляя (6) и (7) в (8) и (9), получаем

$$M_k(p) + \sum_{\gamma=1}^{m-1} M_{\gamma}(p) = \Phi_k(p) Z_k(p) + \Phi_q(p) Z_c(p) + \sum_{\gamma=1}^{m-1} \Phi_{\gamma}(p) R_{\gamma}; \quad (10)$$

$$M_q(p) + \sum_{\delta=1}^{n-1} M_{\delta}(p) = \Phi_k(p) Z_c(p) + \Phi_q(p) Z_{q*}(p) + \sum_{\delta=1}^{n-1} \Phi_{\delta}(p) R_{\delta}, \quad (11)$$

где

$$\left. \begin{aligned} M_k(p) &= \sum_{j=1}^{r+s} \frac{w_{k,j}}{Z_{k,j}(p)} e_{k,j}(p); \\ M_q(p) &= \sum_{j=1}^{r+d} \frac{w_{q,j}}{Z_{q,j}(p)} e_{q,j}(p); \\ Z_k(p) &= R_k + p \sum_{j=1}^{r+s} \frac{w_{k,j}^2}{Z_{k,j}(p)}; \\ Z_q(p) &= R_q + p \sum_{j=1}^{r+d} \frac{w_{q,j}^2}{Z_{q,j}(p)}; \\ Z_c(p) &= p \sum_{j=1}^r \frac{w_{k,j} w_{q,j}}{Z_j(p)}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Уравнения (10) и (11) характеризуют цепь, приведенную на рис. 3, в которой м. д. с. обмоток  $w_{k,r+1}, \dots, w_{k,r+s}$  и  $w_{q,r+1}, \dots$

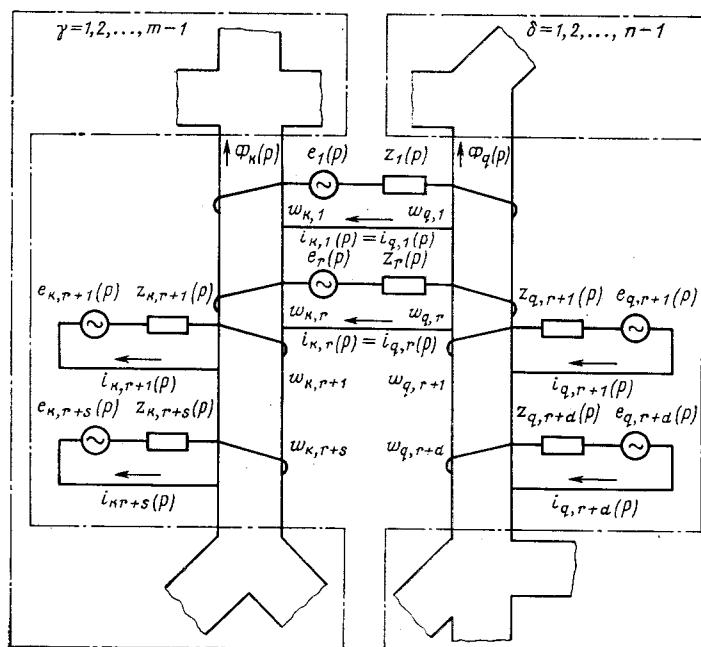


Рис. 2

...,  $w_{q,r+d}$  заменены эквивалентными м. д. с.  $M_k(p)$  и  $M_q(p)$ , магнитные сопротивления  $k$ -й и  $q$ -й ветвей заменены сопротивлениями  $Z_k(p)$  и  $Z_q(p)$ , а для учета влияния контуров электрической связи введен трансформатор магнитных потоков. Коэффициент взаимоиндукции его магнитных потоков определяется соотношением

$$M(p) = \sum_{j=1}^r \frac{w_{k,j} w_{q,j}}{Z_j(p)}.$$

С учетом того, что в (12) величины  $e_{k,j}(p)/Z_{k,j}(p)$  и  $e_{q,j}(p)/Z_{q,j}(p)$  характеризуют токи в цепях соответствующих обмоток при их коротком замыкании, можно установить следующее правило эквивалентного преобразования цепей.

Сложную магнитную цепь с контурами электрической связи можно эквивалентировать магнитной цепью с трансформатором магнитных потоков. При этом эквивалентные м. д. с. стержней определяются суммой м. д. с., созданной каждой из обмоток, равным току в контуре при коротком замыкании этой обмотки. Эквивалентные сопротивления каждого из стержней состоят из магнитного сопротивления стержня исходной цепи и магнитного сопротивления электрической цепи, равного умноженному на оператор  $p$  сумме отношений квадратов чисел витков обмоток к сопротивлению соответствующих контуров. Коэффициент взаимоиндукции магнитных потоков эквивалентного трансформатора равен сумме отношений произведений числа витков в контурах связи к сопротивлениям этих контуров.

Полученные зависимости (12) и (13) и соответствующее правило преобразования могут найти применение при теоретическом анализе и расчете электромагнитных устройств.

#### Список литературы

- Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1973.
- Липман А. А. «Электрическая» и «магнитная» схемы электромагнитной цепи. — Электричество, 1974, № 7.

## Выбор параметров системы сбора телематрической информации

БОГДАНОВ В. А.

Москва

Для автоматизации проектирования систем сбора и передачи телематрической информации в электроэнергетической системе (ЭЭС) необходима разработка критериев и алгоритмов, позволяющих решить следующие основные задачи: определение числа и состава измеряемых параметров; рациональное размещение пунктов измерения; выбор циклов обновления телематрических измерений (ТИ); выбор схемы, структуры и протяженности каналов связи с учетом их пропускной способности, стоимости и надежности.

Возможный подход к решению этих задач указан автором ранее<sup>1</sup>; в данной статье приведен пример, иллюстрирующий практическое применение изложенных им теоретических положений.

Схема, в которой после эквивалентирования оставлено оборудование, находящееся в оперативном подчинении диспетчера рассматриваемой ЭЭС, показана на рисунке. Тонкими линиями обозначены ВЛ 110 кВ, число которых равно 36. Линии большей толщины соответствуют ВЛ 220 кВ, из которых 15 являются внутренними, а две, включенные между узлами 11—44 и 12—45—межсистемными.

Первыми пронумерованы 15 внутренних узлов 220 кВ, а затем 28 внутренних узлов 110 кВ. Последние номера присвоены узлам 44 и 45, находящимся в соседней ЭЭС.

В узле 2 имеется электростанция с генераторами  $2 \times 300$  и  $2 \times 100$  МВт. В узле 10 установлены генераторы  $2 \times 200$  МВт, а в узле 13 — энергоблок 250 МВт.

Максимальная мощность, которая может передаваться по межсистемным ВЛ составляет 250 МВт; по внутренним ВЛ 220 кВ — около 200 МВт, а по ВЛ 110 кВ — до 50 МВт.

В процессе эквивалентирования нагрузка и генерация эквивалентируемых узлов исходной полной схемы ЭЭС были разнесены в оставляемые узлы эквивалентной расчетной схемы. При этом один из наиболее характерных по параметрам и наиболее длительно повторяющихся в течение года режим был выбран в качестве типового. Значения генерации и нагрузки в эквивалентируемых (исключаемых) узлах, соответствующие типовому режиму, использовались при вычислении параметров эквивалентов и, следовательно, оставались неизменными во всех последующих расчетах. Дисперсия возникающей при этом погрешности эквивалентного представления генераторов исключенных узлов  $\Delta_{y\Sigma}^2 = 144$  МВт<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Богданов В. А. Выбор модели установившегося режима и сбор телематрической информации в электроэнергетической системе. — Электричество, 1982, № 6.

Среднеквадратичная погрешность эквивалентного учета генераторов исключаемых узлов  $\Delta_{y\Sigma}^2 = 100$  МВт<sup>2</sup>.

В соответствии с действующими нормами измерений на всех генераторах и ВЛ 220 кВ установлены измерительные трансформаторы класса 1,0. Поэтому постоянная  $B_0 = 46,75 \times 10^4$  МВт<sup>2</sup>.

Константа  $B_{19}$  определяется для образующих эквивалентную расчетную схему 36 ВЛ 110 кВ и 17 ВЛ 220 кВ, из которых две межсистемные:  $B_{19} = 204,5 \cdot 10^4$  МВт<sup>2</sup>.

В соответствии с действующими правилами организации измерений в электроэнергетике минимальная погрешность ТИ активной мощности при имеющихся измерительных трансформаторах и предполагаемых к установке датчиках-преобразователях и устройствах телемеханики  $\varepsilon_{op} = 0,02$ . При этом среднеквадратичная погрешность контроля суммарного баланса активных мощностей  $\sigma_{y\Sigma}^2 = 874$  МВт<sup>2</sup>.

Допустимая погрешность для ТИ активной мощности в ВЛ 220 кВ  $\varepsilon_t^2 = 5,55 \cdot 10^{-4}$ .

При использовании датчиков класса 1,0 и преобразователей аналог — код со среднеквадратичной погрешностью  $\varepsilon_{pi}^2 = 0,013 \times 10^{-4}$  погрешность технических средств системы сбора и передачи телематрической информации  $\varepsilon_t^2 = 3,013 \times 10^{-4}$ . Тогда динамическая погрешность ТИ  $\varepsilon_{ti}^2 = 2,537 \times 10^{-4}$ .

Для реверсивных потоков активной мощности произведение  $P_m^2 \rho_{pi} = 3 \times 10^4$  с. Поэтому цикл обновления ТИ должен составлять  $T_0 + 2 t_{pi} < 7,6$  с.

Если принять за единицу относительную ценность ТИ и телесигналов, поступающих от ВЛ 110 кВ, то для межсистемных ВЛ  $H_m = 5$ , а для всех внутренних ВЛ 220 кВ  $H_j = 4$ .

Относительная ценность телематрической информации, поступающей от электростанции в узле 2, составит  $H_2 = 16$ . Для электростанции узла 10  $H_{10} = 8$ , а для узла 13  $H_{13} = 5$ .

При  $\sigma_{y\Sigma}^2 = 874$  МВт<sup>2</sup> и  $\alpha' = 50$  МВт допустимый показатель надежности, выраженный через относительную ценность ТИ  $Q_d = 2$ .

В соответствии с предложенной автором классификацией, к числу базисных относятся узлы 2, 4, 5, 9, 10, 11, 12, 13, 18, 25, 28, 29, а узлы 3, 34, 39 являются определяющими.

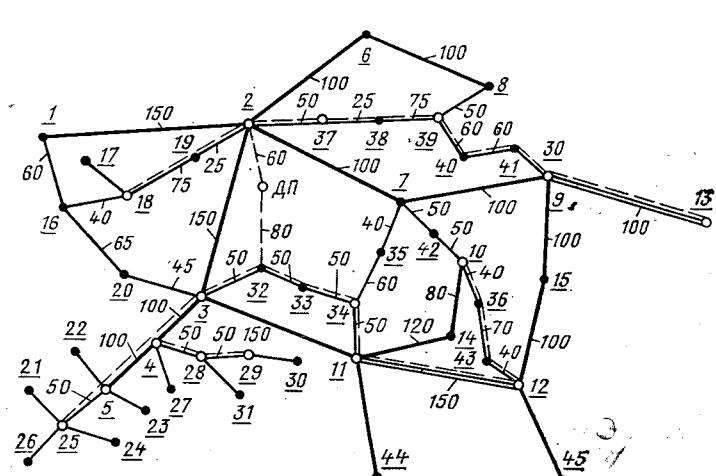
Список Ц, включающий перечисленные выше базисные и определяющие узлы, охватывает все узлы расчетной эквивалентной схемы модели. Поэтому организация промежуточных узлов не требуется.

Во всех указанных основных узлах организуются пункты измерения (ПИ). Наиболее близкими к диспетчерскому пункту (ДП) основными ПИ, от которых возможна прокладка кабельных линий связи, являются узлы 2 и 32. Поэтому выбор схемы каналов начинается с ПИ 2. Для иллюстрации порядка выбора каналов воспользуемся таблицей, где приведены все соединения между основными ПИ, сгруппированные по их длине. Не указаны соединения 2—18 через 1—16 и 2—39 через 6—8, поскольку их длина превышает длину соединений между указанными ПИ, которые приведены в таблице.

Первый канал организуется в соединении 2—18, которое имеет наименьшую длину. При выборе второго участка схемы каналов связи просматриваются и сопоставляются по длине все соединения, инцидентные узлу 2 и узлу 18. Соединения 2—3 и 3—18 имеют одинаковую длину. Для продолжения схемы каналов связи выбирается первое по порядку соединение 2—3, поскольку оно ближе к ДП.

Следующим выбирается соединение 3—4, поскольку оно короче любого из соединений, инцидентных ранее выбранным ПИ 2, 18 и 3.

Дальнейший порядок выбора схемы каналов связи показан в таблице. Поскольку в данном случае организация промежуточных ПИ не требуется, остается определить необходимость организации дополнительных ПИ по условию наблюдаемости всей схемы рассматриваемой модели в целом. Составим список С,



| Длина соединения, км | Пункт измерения начальна |                       |                | Пункт измерения конца    |                       |                | Порядок выбора |
|----------------------|--------------------------|-----------------------|----------------|--------------------------|-----------------------|----------------|----------------|
|                      | Пункт измерения начальна | Пункт измерения конца | Порядок выбора | Пункт измерения начальна | Пункт измерения конца | Порядок выбора |                |
| 50                   | 2                        | 18                    | 1              | 150                      | 3                     | 18             | —              |
|                      | 4                        | 28                    | 4              |                          | 3                     | 34             | —              |
|                      | 5                        | 25                    | 7              |                          | 9                     | 39             | 9              |
|                      | 11                       | 34                    | 12             |                          | 10                    | 12             | 14             |
|                      | 28                       | 29                    | 5              |                          | 11                    | 12             | 13             |
| 100                  | 3                        | 4                     | 3              | 200                      | 2                     | 9              | —              |
|                      | 4                        | 5                     | 6              |                          | 2                     | 10             | —              |
|                      | 9                        | 13                    | 10             |                          | 2                     | 34             | —              |
|                      | 2                        | 3                     | 2              |                          | 9                     | 10             | —              |
|                      | 2                        | 39                    | 8              |                          | 10                    | 11             | —              |
| 150                  | 3                        | 11                    | 11             | 200                      | 10                    | 34             | —              |
|                      | 2                        | 3                     | 2              |                          | 9                     | 12             | —              |
|                      | 2                        | 39                    | 8              |                          | 10                    | 34             | —              |

в котором для каждого основного ПИ будут указаны все инцидентные узлы ветви и узлы, ограничивающие эти ветви с противоположной стороны. По списку С не может быть построено дерево, охватывающее все узлы приведенной на рисунке эквивалентной расчетной схемы модели. Дерево не охватывает ПИ 39 с инцидентными ему ветвями и узлами с противоположной стороны этих ветвей.

По условиям наблюдаемости дополнительный ПИ организуется в узле 37, поскольку из всех граничных узлов 6, 8, 37 и 38 он наименее удален от исходного ПИ 2 и через него проходит ранее выбранная трасса канала связи 2—39—9—18.

По данным эксплуатации и экспертных оценок в первом приближении можно принять вероятность отказа на 100 км ли-

нейного тракта ВЧ-связи по ВЛ 220 кВ равной  $0,97 \times 10^{-4}$  а по ВЛ 110 кВ —  $1,2 \times 10^{-4}$ . Вероятность отказа ПИ определяется по неготовности срабатывания суммы элементов: разделительного фильтра, ВЧ-кабеля, фильтра присоединения, конденсатора связи, заградителя, источника питания и аппаратуры телемеханики типа МКТ-2. Эта величина принимается равной  $0,63 \times 10^{-2}$ .

Вероятность отказа датчиков-преобразователей и групп реле-повторителей телесигналов принимается равной  $1,5 \times 10^{-4}$ .

С учетом оборудования конечных пунктов в узле 2 и 1 ДП и необслуживаемых усиленных пунктов вероятность отказа кабеля связи на участке от ДП до ПИ 2 принята равной  $0,6 \times 10^{-2}$ .

Относительная ценность телемеханической информации, теряемой из-за отказов каналов связи, устройств телемеханики, оборудования ПИ и датчиков преобразователей, рассчитывается с учетом избыточности измерений, обеспечиваемой при выбранном размещении ПИ.

Расчеты показывают, что в первоначальном варианте построения схемы каналов связи относительная ценность теряемой телемеханической информации  $Q(I)=3,183$ . Следовательно, первоначальный вариант системы сбора телемеханической информации не удовлетворяет требованиям надежности.

Наибольшая ценность теряемой телемеханической информации приходится на каналы связи на участках ДП — ПИ 2 и ПИ 2 — ПИ 3. Поэтому в первоначальный вариант системы сбора целесообразно внести следующие изменения: вместо канала в соединении 2—3 организуются два ВЧ-канала в соединениях 3—32 и 32—3 суммарная длина которых равна длине соединения 2—3; организуется кабельная линия связи на участке ДП — узел 3. После внесения этих изменений относительная ценность теряемой телемеханической информации  $Q(I)=1,876$ .

Окончательный вариант системы сбора и передачи телемеханической информации показан на рисунке, где ПИ обозначены кружками а каналы связи — пунктирной линией.

[19.04]

~~~~~

УДК 621.316.1.015.001.24

## Расчет симметричных составляющих напряжения при разрыве одной фазы в сети 0,38 кВ

КРАСНИКОВ В. И., инж., САГУТДИНОВ Р. Ш., канд. техн. наук

МИИСП им. В. П. Горячкана

Характерной особенностью сельских электрических сетей напряжением 0,38 кВ является разветвленность и большая протяженность. Низкий уровень эксплуатации приводит к тому, что неполнофазные режимы — основной вид повреждений в этих сетях.

Исследование влияния несимметричных режимов на работу токоприемников посвящено большое число работ [1 и 2]; однако способы расчета и анализа величин, характеризующих этот процесс, изучены недостаточно. В данной статье предложена методика определения параметров, характеризующих неполнофазный режим в сети 0,38 кВ с однофазной и трехфазной нагрузкой.

Рассмотрим схему электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, в которой от трансформатора 10/0,38 кВ питается сосредоточенная в конце магистральной линии смешанная нагрузка. Сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей элементов принятой схемы электроснабжения приведены к напряжению 0,38 кВ.

Выражение для определения сопротивления нулевой последовательности ВЛ 0,38 кВ принято по [3]:

$$Z_{0\ell} = 4(r_1 + jx_1), \quad (1)$$

где  $r_1$ ,  $x_1$  — активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности линии 0,38 кВ.

В предположении, что напряжение на шинах 10 кВ трансформатора 10/0,38 кВ симметрично и не зависит от нагрузки сети, составлена комплексная схема замещения рассматриваемой сети, при разрыве фазы A воздушной линии 0,38 кВ (рис. 1), где  $U_{\text{пр}} —$

результатирующая э. д. с. особой фазы A схемы прямой последовательности.

Используя методику расчета неполнофазных режимов, составим расчетные выражения для определения (в относительных единицах) напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей в конце линии 0,38 кВ, характеризующие данный несимметричный режим:

$$U_1 = \sqrt{\frac{A^2 + C^2}{B^2 + D^2}};$$

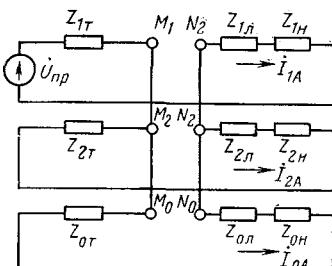


Рис. 1

$$U_2 = \sqrt{\frac{E^2 + F^2}{B^2 + D^2}}; \quad (3)$$

$$U_0 = \sqrt{\frac{G^2 + H^2}{B^2 + D^2}}, \quad (4)$$

где коэффициенты  $A, B, C, D, E, F, G, H$  определяются комплексной схемой замещения сети и сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательностей элементов схемы электроснабжения и смешанной нагрузки сети:

$$\begin{aligned} A &= r_{1H}(r_2 + r_0) - x_{1H}(x_2 + x_0); \\ B &= r_1(r_2 + r_0) + r_2r_0 - x_1(x_2 + x_0) - x_2x_0; \\ C &= r_{1H}(x_2 + x_0) + x_{1H}(r_2 + r_0); \\ D &= r_1(x_2 + x_0) + r_2x_0 + x_1(r_2 + r_0) + x_2r_0; \\ E &= r_0r_{2H} - x_0x_{2H}; \\ F &= r_0x_{2H} + x_0r_{2H}; \\ G &= r_2r_{0H} - x_2x_{0H}; \\ H &= r_2x_{0H} + x_2r_{0H}. \end{aligned}$$

Принимая допущение, что однофазная нагрузка сети имеет статический характер [3], на основании принятой схемы замещения для одной фазы узла нагрузки определим сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей смешанной нагрузки.

Введем некоторые обозначения:

$\alpha = S_H/S_B$  — относительная мощность нагрузки ВЛ 0,38 кВ;  $S_H$  — мощность присоединенной смешанной нагрузки;  $S_B$  — базисная мощность, равная мощности трансформатора 10/0,38 кВ;  $\cos \Phi_D$  — коэффициент мощности трехфазной двигательной нагрузки;  $\cos \Phi_H$  — коэффициент мощности на зажимах узла нагрузки.

В общем случае

$$S_B = S_D + S_{(1)},$$

где  $S_D$  — мощность электродвигательной части нагрузки сети;  $S_{(1)}$  — мощность однофазной нагрузки сети.

Сопротивление смешанной нагрузки, приведенное к базисным условиям,

$$Z_H = \frac{1}{\alpha}.$$

Принимая в расчете в относительных единицах  $S_{(1)} = p$ , с учетом схемы замещения узла нагрузки отметим, что

$$\frac{S_{(1)}}{S_H} = p; \quad \frac{S_D}{S_H} = 1 - p.$$

Тогда после преобразований получим:

$$Z_{(1)} = \frac{1}{\alpha p}; \quad (5)$$

$$Z_D = \frac{1}{\alpha(1-p)}, \quad (6)$$

где  $Z_{(1)}$  — сопротивление однофазной нагрузки сети;  $Z_D$  — сопротивление трехфазной двигательной нагрузки сети.

Таким образом, сопротивления прямой последовательности нагрузки определяется как сопротивления нормального нагрузочного режима:

$$\left. \begin{aligned} Z_{1H} &= \frac{1}{\alpha}; \\ r_{1H} &= \frac{\cos \Phi_H}{\alpha}; \\ x_{1H} &= \frac{\sin \Phi_H}{\alpha}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Сопротивление обратной последовательности двигательной нагрузки в расчете учитывается как сопротивление короткого замыкания:

$$Z_{2D} = \frac{Z_{D,H}}{K_i}, \quad (8)$$

где  $Z_{D,H}$  — сопротивление двигателей при номинальной нагрузке;  $m_i$  — степень загрузки двигателей;  $K_i$  — кратность пускового тока.

Учитывая (6), можно записать

$$Z_{2D} = \frac{m_i}{\alpha K_i (1-p)}, \quad (9)$$

составляющие которого

$$r_{2D} = Z_{2D} \cos \Phi_D; \quad x_{2D} = Z_{2D} \sin \Phi_D;$$

$\cos \Phi_D$  — коэффициент мощности при пуске двигателей (при расчете выбран по каталожным данным).

Активная и реактивная проводимости обратной последовательности схемы замещения узла нагрузки

$$g_{2H} = \frac{r_{(1)}}{Z_{(1)}^2} + \frac{r_{2D}}{Z_{2D}^2}; \quad b_{2H} = \frac{x_{(1)}}{Z_{(1)}^2} + \frac{x_{2D}}{Z_{2D}^2}.$$

После преобразований с учетом (9) получим

$$\left. \begin{aligned} g_{2H} &= \alpha \left[ \cos \Phi_H - (1-p) \cos \Phi_D + (1-p) \cos \Phi_H \frac{K_i}{m_i} \right]; \\ b_{2H} &= \alpha \left[ \sin \Phi_H - (1-p) \sin \Phi_D + (1-p) \sin \Phi_H \frac{K_i}{m_i} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Тогда интересующие нас сопротивления обратной последовательности смешанной нагрузки

$$\left. \begin{aligned} r_{2H} &= \frac{g_{2H}}{(Y_{2H})^2}; \\ x_{2H} &= \frac{b_{2H}}{(Y_{2H})}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где  $Y_{2H}^2 = g_{2H}^2 + b_{2H}^2$  — полная проводимость нагрузки сети 0,38 кВ.

Сопротивление нулевой последовательности нагрузки в сети 0,38 кВ обусловлено наличием однофазных токоприемников, включенных на фазное напряжение. Учитывая, что однофазная нагрузка имеет статический характер, можно, не приводя преобразований, записать:

$$\left. \begin{aligned} r_{0H} &= \frac{1}{\alpha p^2} [\cos \Phi_H - (1-p) \cos \Phi_D]; \\ x_{0H} &= \frac{1}{\alpha p^2} [\sin \Phi_H - (1-p) \sin \Phi_D]. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

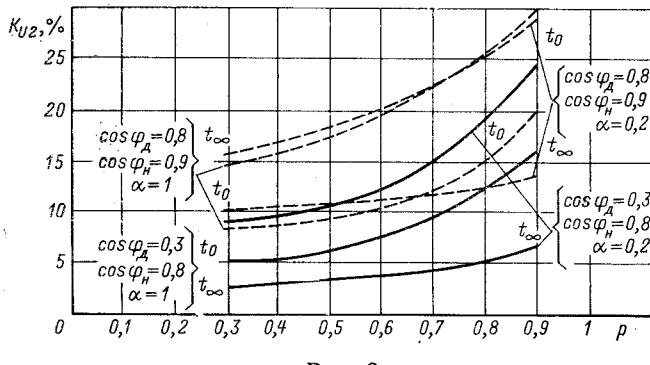
Расчет напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей при сбыве фазы  $A$  в сети 0,38 кВ проведен в ЦВМ ЕС 1022. При этом величина  $\alpha$  изменялась от 0,2 до 1;  $\cos \Phi_D$  — от 0,3 (режим холостого хода) до 0,8 (номинальная нагрузка);  $\cos \Phi_H$  — от 0,65 до 0,95. Для отображивания заранее неприемлемых вариантов были введены ограничения:

$$[\cos \Phi_H > \cos \Phi_D; \cos \Phi_H \leqslant 1]$$

Результаты были получены для моментов времени  $t=0$  и  $t=\infty$ , т. е. определялись напряжения всех последовательностей в зависимости от предшествующего нагрузочного режима ( $t=0$ ) и при установившемся режиме из-за влияния несимметрии напряжения на зажимах нагрузки, согласно [4], было учтено уменьшение сопротивления прямой последовательности трехфазной двигательной нагрузки. В этом случае их сопротивление определялось с учетом коэффициента увеличения загрузки двигателей по току  $\Delta i$ . Поскольку сопротивление обратной последовательности двигательной нагрузки есть сопротивление короткого замыкания и оно не зависит от несимметрии питающего напряжения, то данная величина определялась как для начального момента возникновения неполнофазного режима по выражению (9), а сопротивление обратной последовательности смешанной нагрузки — по (11).

Расчеты произведены для наиболее часто применяемых в практике электроснабжения сельскохозяйственных потребителей мощности силовых трансформаторов от 25 до 400 кВ·А и длинах отходящих линий 0,38 кВ 500—1000 м.

На рис. 2 в качестве примера приведены кривые изменения коэффициента несимметрии напряжений  $K_{U2}$  (ГОСТ 13109-67)



от изменения мощности  $p$  однофазной нагрузки сети (в относительных единицах) для трансформатора мощностью 160 кВ·А в конце линии 0,38 кВ длиной 500 м.

Как видно из рис. 2, при малых значениях  $p$  (когда преобладающее значение в сети имеет двигательная нагрузка) коэффициент несимметрии напряжений в конце ВЛ 0,38 кВ имеет минимальное значение; сказывается влияние симметричной нагрузки сети. Следует отметить, что в зависимости от режима двигательной нагрузки,  $K_{U_2}$  может принимать различные значения. Вместе с тем имеет значение относительная мощность нагрузки ВЛ 0,38 кВ  $\alpha$ , которая показывает, какую долю мощности трансформатора составляет нагрузка, присоединенная к исследуемой ВЛ. С увеличением  $p$ , т. е. с ростом доли однофазной и уменьшением электродвигательной нагрузок,  $K_{U_2}$  увеличивается и достигает максимального значения (при  $p \rightarrow 1$ ), хотя и в этом случае сказывается электродвигательная нагрузка. Эта зависимость следует из выражения (3), в котором при увеличении  $p$ , наблюдается более быстрый рост числителя по отношению к знаменателю, в результате чего происходит увеличение напряжения обратной последовательности.

На рис. 3 приведены зависимости напряжений прямой и обратной последовательностей на зажимах нагрузки от  $\cos \varphi_h$ , из которых видно, что напряжение обратной последовательности изменяется от минимального значения при  $\cos \varphi_h = 0,3$  до максимального (при номинальной двигательной нагрузке). Однако и в этом случае сказывается наличие однофазной нагрузки. Наряду с этим из рис. 3 следует, что напряжение прямой последовательности уменьшается при изменении характера нагрузки сети. Такое изменение  $U_1$ ,  $U_2$  от  $\cos \varphi_h$  следует из анализа выражений (2) и (3).

Исследования зависимостей  $K_{U_2} = f(p)$  и  $U_2 = f(\cos \varphi_h)$  для шин низшего напряжения подстанции 10/0,38 кВ при обрыве фазы ВЛ 0,38 кВ показали, что значения  $K_{U_2}$  и  $U_2$  на порядок меньше значений, определенных в конце ВЛ 0,38 кВ.

Для реальных эксплуатационных условий при неполнофазном режиме напряжение обратной последовательности в

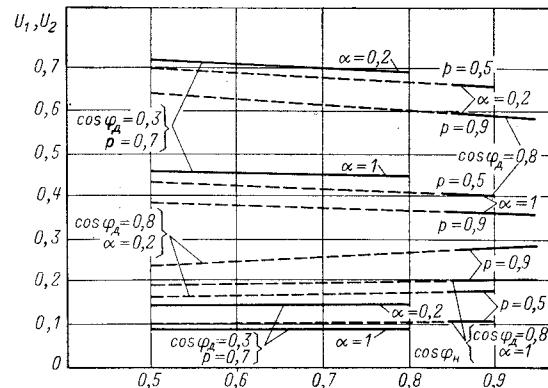


Рис. 3

конце линии 0,38 кВ составляет  $(0,14-0,18) U_L$  при преобладании в сети двигательной нагрузки, работающей с номинальными параметрами. При преобладании в сети однофазной нагрузки эта величина принимает значения  $(0,25-0,39) U_L$ . В случае работы двигательной нагрузки в режиме холостого хода при минимальной доле однофазной нагрузки в сети  $U_2 = (0,07-0,1) U_L$ . При преобладании однофазной нагрузки эта величина составляет  $(0,21-0,26) U_L$ , где  $U_L$  — линейное напряжение сети.

Расчеты симметричных составляющих напряжений на шинах низшего напряжения подстанции 10/0,38 кВ, для трансформаторов 25—400 кВ·А показали, что напряжение обратной последовательности при обрыве фазы принимает значения от  $(0,009-0,029) U_L$ , при преобладании двигательной нагрузки, работающей с номинальными параметрами, до  $(0,008-0,027) U_L$ , при преобладании однофазной нагрузки и работе электродвигателей в режиме холостого хода.

Для защиты электрических сетей напряжением 0,38 кВ от неполнофазных режимов необходимо контролировать напряжение обратной последовательности в конце ВЛ 0,38 кВ. В общем случае установка устройств контроля неполнофазных режимов по напряжению обратной последовательности должна быть не менее  $0,14 U_L$ .

#### Список литературы

1. Зимин Е. Н. Защита асинхронных двигателей до 500 В. — М.: Энергия, 1967.
2. Мусин А. М. Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты. — М.: Колос, 1979.
3. Мотуско Ф. Я. Защитные устройства в электроустановках. — М.: Энергия, 1973.
4. Плющ Б. М., Абдулрахманов К. А. Параметры трехфазного асинхронного двигателя при несимметрии и несинусоидальности напряжения сети. — Изв. вузов. Энергетика, 1966, № 1.

[31.08.82]

УДК 621.315.611:537.311.3

## Механизм поверхностной проводимости твердых диэлектриков

СОБОЛЕВ В. Г., канд. техн. наук

Калининский политехнический институт

Одним из важнейших параметров, характеризующим надежность и долговечность твердого диэлектрика, принято считать его удельную поверхностную проводимость  $\gamma_s$ . Значение  $\gamma_s$  для каждой марки электроизоляционного материала при заданных условиях эксплуатации (относительная влажность воздуха, температура  $T$ , концентрация солей или щелочей в адсорбированной пленке воды и др.) обычно измеряется в соответствии с ГОСТ 6433.2-71. Обширный экспериментальный материал по измеренным значениям  $\gamma_s$  (или  $\rho_s$  — удельного поверх-

ностного сопротивления) можно найти в публикациях советских и иностранных авторов [1—4]. Однако эти данные не несут полной информации, которая необходима при прогнозировании надежности изделий, поскольку результаты экспериментов были получены, как правило, для фиксированных значений влажности, температуры и концентрации водного раствора или для узкого диапазона их изменений.

Наиболее перспективным при прогнозировании надежности изоляционных конструкций является использование аналити-

ческого метода расчета поверхностной проводимости твердых диэлектриков. Однако разработке аналитического метода расчета должно предшествовать изучение физических процессов, протекающих на поверхности влажных диэлектриков. Этот вопрос в настоящее время, по нашему мнению, недостаточно глубоко исследован, а изучение его представляет научный и практический интерес.

В настоящей статье были поставлены задачи по изучению механизма и разработке методики прогнозирования поверхностной проводимости твердых диэлектриков для заданных условий эксплуатации.

Экспериментально установлено, что при эксплуатации изделия в условиях влажного воздуха основной причиной высокой поверхностной проводимости является присутствие пленки воды на поверхности диэлектрика. Толщина адсорбированной пленки воды  $h$  зависит от свойства и строения поверхности материала, давления паров воды и температуры. Вместе с тем известно, что адсорбированная на твердой поверхности пленка воды по своей структуре и проводимости не является однородной. Это объясняется, согласно теории Гельмгольца, образованием двойного электрического слоя (ДЭС) на границе раздела твердое тело — жидкость [5]. По теории Смолуховского — Штерна двойной электрический слой разделяется на неподвижный (плотный) слой  $S'$  и диффузный слой  $S''$ , последний под действием внешнего электрического поля может перемещаться в направлении поля (явление электроосмоса).

При больших толщинах пленки воды образуется слой  $S_0$ , обладающий свойствами водного раствора в несвязанном (свободном) состоянии. Следовательно, адсорбированная пленка воды может находиться в трех фазовых состояниях. Общая толщина пленки  $h$  на поверхности диэлектрика складывается из толщины пленки  $\delta$ , образующей двойной электрический слой и толщины пленки водного раствора  $h_0$ , находящегося в свободном состоянии, т. к.  $h=h_0+\delta$  (рис. 1).

Если в свободном растворе число положительных и отрицательных ионов равно, то в ДЭС, например при отрицательно заряженной твердой поверхности, количество катионов преобладает над анионами. Таким образом, двойной электрический слой обуславливает добавочную поверхностную проводимость за счет подвижности избыточных ионов, и это положение следует принимать во внимание при разработке метода расчета поверхностной проводимости.

При выводе уравнения, описывающего удельную поверхностную проводимость  $\gamma_s$  диэлектрика, учитывалась удельная проводимость поверхности самого вещества в сухом воздухе  $\gamma_{s(c)}$  и удельная проводимость адсорбированной пленки воды, которая представлена двумя составляющими: удельной проводимостью свободного раствора  $\gamma_{s(0)}$  и удельной проводимостью ДЭС  $\gamma_{d.c.}$

Тогда

$$\gamma_s = \gamma_{s(c)} + \gamma_{s(0)} + \gamma_{d.c.} \quad (1)$$

Собственная удельная поверхностная проводимость диэлектрика определяется исходя из общего представления о проводимости вещества по формуле [6]:

$$\gamma_{s(c)} = nq\mu, \quad (2)$$

где  $n$  — количество свободных частиц на единице площади, т. е. концентрация носителей заряда на поверхности диэлектрика,  $1/m^2$ ;  $q$  — заряд каждой частицы, участвующей в переносе тока, Кл;  $\mu$  — подвижность носителей заряда — иона,  $m^2/(B \cdot c)$ .

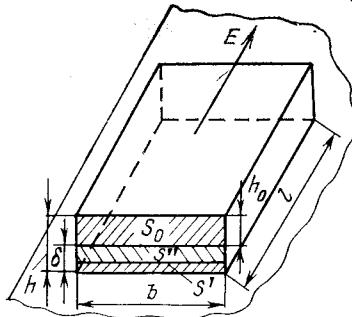


Рис. 1. Модель строения адсорбированной пленки воды на поверхности твердого диэлектрика

Подвижность иона зависит от температуры  $T$ ; связь между  $\mu$  и  $T$  описывается уравнением [6]:

$$\mu = \frac{q\delta^2 v}{6kT} \exp\left(-\frac{w_p}{kT}\right), \quad (3)$$

где  $q$  — заряд иона;  $\delta$  — длина пробега иона;  $v$  — частота колебания иона;  $k$  — постоянная Больцмана;  $w_p$  — потенциальная энергия.

Тогда поверхностная проводимость диэлектрика в зависимости от температуры с учетом (2) и (3)

$$\gamma_s = nq \frac{q\delta^2 v}{6kT} \exp\left(-\frac{w_p}{kT}\right). \quad (4)$$

Удельная поверхностная проводимость водной пленки (свободного раствора) может быть определена из выражения

$$\gamma_{s(0)} = \gamma_v h, \quad (5)$$

где  $\gamma_v$  — удельная объемная проводимость водного раствора<sup>1</sup>.

Величина  $\gamma_v$  для электролита с одинаковой концентрацией  $c$  катионов и анионов в единице объема и с подвижностью  $\mu_k$  и  $\mu_a$  определяется как

$$\gamma_v = cF(\mu_k + \mu_a), \quad (6)$$

где  $F$  — число Фарадея.

Тогда

$$\gamma_{s(0)} = cF(\mu_k + \mu_a)h. \quad (7)$$

Общая толщина адсорбированной пленки  $h$  на поверхности диэлектрика может быть определена из уравнений полимолекулярной теории адсорбции. Если обозначить через  $\sigma_0$  число молекул воды в монослое и через  $\sigma$  общее число адсорбированных молекул, тогда количество молекуларных слоев в пленке

$$\theta = \sigma/\sigma_0,$$

а толщина адсорбированной пленки

$$h = \theta d, \quad (8)$$

где  $d$  — диаметр молекулы ( $\sim 3 \cdot 10^{-10}$  м).

Для непористой и однородной поверхности число адсорбированных слоев  $\theta$  можно рассчитать по уравнению Брунауэра — Эммета — Теллера (БЭТ) при относительном давлении паров воды  $p/p_0$ , равном  $0,05 \div 0,35$  [7]:

$$\theta = \frac{kp}{(q-p)\left[1 + (k-1)\frac{p}{q}\right]}, \quad (9)$$

где  $p$  — давление паров воды;  $k$  и  $q$  — постоянные.

При высоких давлениях паров ( $p/p_0 > 0,35$ ) большая точность расчетов получается по уравнению Френкеля — Хелси — Хилла [8]:

$$\theta = \sqrt{\frac{a}{\ln p/p_0}}, \quad (10)$$

где  $p/p_0$  — относительное давление паров;  $s$  и  $a$  — постоянные.

<sup>1</sup> Добавочную удельную проводимость, создаваемую влиянием ДЭС, можно определить по уравнению Бикермана [5], которое для открытой поверхности принимает вид

$$\gamma_{d.c.} = \sqrt{8\epsilon_0\epsilon RTc} \left( \frac{\mu_k}{A-1} - \frac{\mu_a}{A+1} + \frac{4\epsilon_0\epsilon RT}{z\eta F} \frac{1}{A^2-1} \right) = \sqrt{8\epsilon_0\epsilon RTc} \Psi(\xi), \quad (11)$$

где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная;  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость водного раствора;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — температура;  $c$  — концентрация водного раствора;  $z$  — валентность ионов;  $\eta$  — динамическая вязкость раствора;  $F$  — число Фарадея;  $\mu_k$  и  $\mu_a$  — подвижность катионов и анионов;  $\xi$  — электрохимический потенциал (или  $\zeta$  — потенциал).

Величина  $A$  в уравнении (11) связана с  $\xi$ -потенциалом зависимостью

$$A = \left( \sqrt{\exp - \frac{zF\xi}{2RT}} + 1 \right) / \left( \sqrt{\exp - \frac{zF\xi}{2RT}} - 1 \right).$$

<sup>1</sup> Диэлектрические параметры воды, как показали исследования [12, 13], не остаются неизменными, а зависят от многих факторов (толщины водной пленки, технологии обработки и др.). С целью упрощения расчетных формул в настоящей работе диэлектрические свойства воды принимались без аномалий.

Таблица 1

Концентрация водного раствора $c$ , г-экв/ $m^3$	Удельная проводимость двойного слоя $\gamma_{d.c}$ (См) при значениях $\zeta$ -потенциала				Удельная поверхностная проводимость пленки водного раствора $\gamma_s(0)$ , См
	5 мВ	10 мВ	50 мВ	100 мВ	
100	$1,33 \cdot 10^{-11}$	$5,3 \cdot 10^{-11}$	$1,45 \cdot 10^{-9}$	$7,32 \cdot 10^{-9}$	$1,33 \cdot 10^{-9}$
10	$4,2 \cdot 10^{-12}$	$1,68 \cdot 10^{-11}$	$4,6 \cdot 10^{-10}$	$2,32 \cdot 10^{-9}$	$4,2 \cdot 10^{-10}$
1	$1,33 \cdot 10^{-12}$	$5,3 \cdot 10^{-12}$	$1,45 \cdot 10^{-10}$	$1,33 \cdot 10^{-10}$	$1,33 \cdot 10^{-10}$
0,1	$4,2 \cdot 10^{-13}$	$1,68 \cdot 10^{-12}$	$4,6 \cdot 10^{-11}$	$2,32 \cdot 10^{-10}$	$4,2 \cdot 10^{-11}$
0,01	$1,33 \cdot 10^{-13}$	$5,3 \cdot 10^{-13}$	$1,45 \cdot 10^{-11}$	$7,32 \cdot 10^{-11}$	$1,33 \cdot 10^{-11}$
(дистиллированная вода)					

Рассмотрим влияние ДЭС на удельную проводимость пленки воды, адсорбированной на поверхности твердого диэлектрика. Анализ проведем в предположении, что толщины ДЭС и пленки, находящейся в свободном состоянии, равны между собой, т. е.  $\delta = h_0$ . Пренебрегая составляющей  $\gamma_{s(c)}$  вследствие малого ее значения по сравнению с проводимостью пленки водного раствора, уравнение (1) с учетом (7) и (11) принимает вид

$$\gamma_s = \gamma_{s(0)} + \gamma_{d.c} = \sqrt{8\epsilon_0\epsilon RTc} \psi(\zeta) + cF(u_k + u_a)\delta, \quad (12)$$

где  $\delta$  — толщина ДЭС.

Расчет проведем на примере одно-одновалентного водного раствора KCl, для которого  $u_k = u_a = u$  и  $z = 1$ . Тогда выражение функции  $\psi(\zeta)$  для этого раствора согласно [5] принимает вид

$$\psi(\zeta) = \frac{u}{2} \left[ \exp\left(-\frac{F\zeta}{2RT}\right) + \exp\left(\frac{F\zeta}{2RT}\right) - 2 \right]. \quad (13)$$

Толщина ДЭС согласно уравнению Гуи [5]:

$$\delta = \frac{1}{zF} \sqrt{\frac{\epsilon_0\epsilon RT}{2c}}. \quad (14)$$

Уравнение (12) с учетом (13) и (14) можно представить следующим образом:

$$\gamma_s = \sqrt{2\epsilon_0\epsilon RTc} u \left[ \exp\left(-\frac{F\zeta}{2RT}\right) + \exp\left(\frac{F\zeta}{2RT}\right) - 2 \right] + \sqrt{2\epsilon_0\epsilon RTc} u. \quad (15)$$

Из сравнения первого и второго слагаемых уравнения (15) видно, что они отличаются друг от друга множителем  $\left[ \exp\left(-\frac{F\zeta}{2RT}\right) + \exp\left(\frac{F\zeta}{2RT}\right) - 2 \right]$ , значение которого зависит от температуры и  $\zeta$ -потенциала.

В табл. 1 приведены значения  $\gamma_{d.c}$  и  $\gamma_{s(0)}$ , рассчитанные по формуле (15) как отдельные слагаемые при  $T=293$  К для разной концентрации водного раствора KCl ( $u_k = u_a = 7,1 \cdot 10^{-8}$  м $^2$ /(В·с);  $\epsilon = 81$ ) и для различных значений  $\zeta$ -потенциала.

Из табл. 1 видно, что удельная проводимость ДЭС при значениях  $\zeta$ -потенциала менее 50 мВ мала по сравнению с величиной  $\gamma_{s(0)}$ . При значении  $\zeta$ -потенциала, равном или большем 50 мВ, величина  $\gamma_{d.c}$  становится соизмеримой или больше величины  $\gamma_{s(0)}$ . На основании этого расчета можно сделать вывод, что проводимость двойного электрического слоя вносит заметный вклад в полную проводимость при значении  $\zeta$ -потенциала выше 50 мВ. Так, например, при  $\zeta=100$  мВ величина  $\gamma_{d.c}$  превышает  $\gamma_{s(0)}$  примерно в шесть раз.

Для некоторых электроизоляционных материалов экспериментальным путем были определены значения  $\zeta$ -потенциала (табл. 2) по методике [9].

Из табл. 2 видно, что  $\zeta$ -потенциал для таких материалов, как ДО-2, К-78-51 и стеклотекстолит, превышает 50 мВ, а это означает, что составляющую проводимость ДЭС  $\gamma_{d.c}$  следует учитывать при расчете величины  $\gamma_s$  для этих материалов.

Температурная зависимость поверхностной проводимости в сухом воздухе ( $p/p_0=0$ ) согласно уравнению (4) представляет в полулогарифмическом масштабе прямую линию, и это подтверждается опытами, проведенными на эпоксидном компаунде ЭД-20. При высоких давлениях паров воды зависимость  $\lg \gamma_s - 1/T$  принимает сложный характер. В начальный пе-

Таблица 2

Марка электроизоляционного материала	$\zeta$ -потенциал, мВ
Пресс-материалы ДО-2, К-78-51 (ГОСТ 9359-73)	56
Компаунд ЭД-20 (без наполнителя, ГОСТ 10587-72)	45
Стеклотекстолит СТ-1 (ГОСТ 12652-67)	75

риод нагрева образца при превышении температуры его поверхности над температурой воздуха на несколько градусов ( $7-10$  °C) наблюдается резкий спад значения  $\gamma_s$  из-за уменьшения толщины водной пленки. При полном высыхании пленки зависимость поверхностной проводимости диэлектрика от температуры описывается уравнением (4).

На рис. 2 приведены зависимости  $\gamma_s$  от относительного давления паров дистиллированной воды, полученные при  $T=293$  К экспериментальным путем по методике [10]. Как видно из рис. 2, характер кривых зависимости  $\gamma_s - p/p_0$  для исследуемых материалов одинаков. При росте давления паров воды от нуля до 0,7 проводимость незначительно возрастает, и это объясняется формированием мономолекулярного слоя адсорбированной пленки на поверхности материала. При давлении паров, начиная с 0,7, замечен резкий рост поверхностной проводимости, что обусловлено образованием полимолекулярных слоев пленки. В атмосфере сухого воздуха величина  $\gamma_s$  имее-

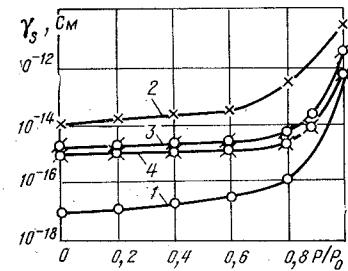


Рис. 2. Зависимость  $\gamma_s = f(p/p_0)$  для электроизоляционных материалов: 1 — ЭД-20; 2 — К-78-51; 3 — ДО-2; 4 — СТ-1

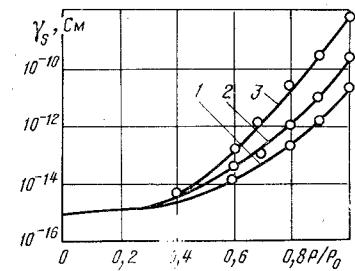


Рис. 3. Зависимость  $\gamma_s = f(p/p_0)$  для пресс-материала ДО-2 при концентрации водного раствора KCl: 1 — 1 г-экв/ $m^3$ ; 2 — 10 г-экв/ $m^3$ ; 3 — 100 г-экв/ $m^3$

малое значение ( $10^{-17} \div 10^{-14}$  См), а при давлении паров  $p/p_0 = 1$  поверхностная проводимость возрастает на 2—4 порядка и составляет  $1 \cdot 10^{-13} \div 5 \cdot 10^{-11}$  См.

Влияние концентрации водного раствора KCl на величину  $\gamma_s$  для пресс-материала ДО-2 характеризуется рис. 3. Опыты проводились при  $T=293$  К, а концентрация раствора создавалась по методике, имитирующей условия соляного тумана [11]. С увеличением концентрации раствора, как видно из рис. 3, поверхностная проводимость материала значительно возрастает (на 1,5—2,5 порядка). Эти опыты подтверждают электролитический характер поверхностной проводимости диэлектриков [11].

Для условий высокой влажности воздуха ( $p/p_0 > 0,6$ ) методика прогнозирования удельной поверхностной проводимости твердых диэлектриков сводится к следующим операциям.

1. Задаются условия эксплуатации электроизоляционной конструкции, т. е. относительное давление паров воды  $p/p_0$ , температура окружающего воздуха и концентрация водного раствора в адсорбированной пленке. При эксплуатации изделия в условиях морского или соляного тумана состав растворимых солей и концентрация водного раствора принимается по ГОСТ 4233-77. В других условиях эксплуатации, например в рудниках, угольных шахтах, состав растворимых газов, солей и щелочей и концентрация раствора выбираются по справочникам.

2. Определяется толщина адсорбированной пленки воды по формуле (8), при этом величина  $\theta$  в этой формуле рассчитывается по уравнению (10). Обработка экспериментальных данных (рис. 2) на ЭВМ М-222 показала, что рассчитанные по формуле (10) результаты дают хорошую сходимость с экспериментом при относительном давлении паров от 0,4 до 1. Для исследуемых материалов в формуле (10) постоянная  $s=0,5$ , а постоянная  $a$  для ЭД-20 составляет 0,136, для К-78-51—0,129, для ДО-2—0,07, для СТ-1—0,0142.

3. Рассчитывается по формуле (6) удельная объемная проводимость водного раствора  $\gamma_s$ , а затем по формуле (7) определяется удельная поверхностная проводимость влажного диэлектрика  $\gamma_{s(0)}=\gamma_s h$ .

4. Если значение  $\zeta$ -потенциала для исследуемого диэлектрика равно или превышает 50 мВ, тогда к  $\gamma_{s(0)}$  дополнительно добавляется величина удельной проводимости ДЭС, рассчитанная по формуле (11).

5. Зная величину  $\gamma_s=\gamma_{s(0)}+\gamma_{d.c}$  и коэффициент, учитывающий геометрическую форму изолятора  $k_s$ , поверхностную проводимость готового изделия можно рассчитать по формуле

$$\gamma_p = \gamma_s k_s$$

**Выводы.** 1. Описан механизм и получено с рядом допущений общее уравнение поверхностной проводимости твердых диэлектриков.

2. Показано, что при высокой относительной влажности воздуха поверхностная проводимость диэлектрика обусловлена проводимостью двойного электрического слоя и проводимостью раствора, находящегося в свободном состоянии. Соотношение этих составляющих поверхностной проводимости зависит от концентрации раствора, давления паров воды, свойства и строения поверхности диэлектрика.

3. Предложена методика прогнозирования поверхностной проводимости твердых диэлектриков для заданных условий эксплуатации.

### Список литературы

1. Михайлов М. М. Влагопроницаемость органических диэлектриков. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1960.—164 с.
2. Яманов С. А. Новые электроизоляционные материалы и проблема надежности. — М.: Энергия, 1971.—125 с.
3. Маслов В. В. Влагостойкость электрической изоляции. — М.: Энергия, 1973.—208 с.
4. Вайда Д. Исследование повреждений изоляции. — М.: Энергия, 1968.—399 с.
5. Электрокинетические свойства капиллярных систем/Отв. ред. П. А. Ребиндер. — М.—Л.: Изд. АН СССР, 1956.—352 с.
6. Сканави Г. И. Физика диэлектриков (область слабых полей). — М.—Л.: Гостехиздат, 1949.—500 с.
7. Я. де Бур. Динамический характер адсорбции. — М.: Иностр. лит.-ра, 1962.—290 с.
8. Катализ. Вопросы теории и методы исследования. — М.: Иностр. лит.-ра, 1955.—368 с.
9. Григоров О. Н. Электрокинетические явления — Л.: Изд-во ЛГУ, 1973.—293 с.
10. Санжаровский О. П., Соболев В. Г. Изменение поверхностной проводимости эпоксидного компаунда в присутствии адсорбированных слоев воды. — Коллоидный журнал, 1974, т. 35, № 3, с. 515—519.
11. Абдрахманова И. Ф., Дерягин Б. В. Поверхностная проводимость кварца в присутствии адсорбированных слоев воды. — Докл. АН СССР, 1958, т. 120, № 1, с. 94—97.

[06.01.82]

~~~~~

## РЕДАКЦИЯ И РЕДКОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО» ПОЗДРАВЛЯЮТ

доктора техн. наук Мееровича Э. А. (ЭНИИ им. Г. М. Кржижановского) и доктора техн. наук Чальян К. М. (Институт физики АН АзССР) — лауреатов премии им. П. Н. Яблочкива АН СССР 1982 г. за серию работ «Математическая модель для расчета электромагнитных режимов пофазноэкранированных токопроводов от современных сверхмощных генераторов».

# О расчете электростатических полей в кусочно-однородных средах

КНЯЗЬ А. И., ДРАГАНОВ В. М.

Одесса

Большое число задач электротехники приводит к расчету электрического или магнитного поля в кусочно-однородной среде при граничных условиях двух типов:

а) на границе  $\Gamma_1$  идеального проводника задано условие Дирихле

$$V = V_{\Gamma_1}; \quad (1)$$

б) на границе  $\Gamma_2$  раздела двух диэлектрических сред с диэлектрическими проницаемостями  $\epsilon^+$  и  $\epsilon^-$  заданы условия сопряжения

$$\frac{\partial V^+}{\partial \tau} = \frac{\partial V^-}{\partial \tau}; \quad (2)$$

$$\epsilon^+ \frac{\partial V^+}{\partial n} = \epsilon^- \frac{\partial V^-}{\partial n}. \quad (3)$$

В приведенных формулах  $V = V(x, y, z)$  — скалярный потенциал поля, а  $\tau$  и  $n$  обозначают направления касательной и нормали к границе  $\Gamma_2$ .

Решение таких задач можно получить путем сочетания методов решения задачи Дирихле и решения задачи сопряжения (в первую очередь, метода вторичных источников).

Данная статья посвящена развитию этого положения для электростатических плоскопараллельных полей.

Определим потенциал плоскопараллельного (ПП) поля в кусочно-однородной среде с границей раздела  $\Gamma_2$ , создаваемого бесконечным заряженным проводом, ось которого расположена в точке с координатами  $(x_1, y_1)$ , при задании условия Дирихле на контуре  $\Gamma_1$ , ограничивающем сечение второго электрода (рис. 1).

Решение поставленной граничной задачи будем искать в виде суммы двух потенциалов:

$$V = V_1 + V_2. \quad (4)$$

Заданные граничные условия:

$$V = V_{\Gamma_1}; \quad (5)$$

$$\left( \frac{\partial V^+}{\partial \tau} - \frac{\partial V^-}{\partial \tau} \right)_{\Gamma_2} = 0; \quad (6)$$

$$\left( \epsilon^+ \frac{\partial V^+}{\partial n} - \epsilon^- \frac{\partial V^-}{\partial n} \right)_{\Gamma_2} = 0 \quad (7)$$

будем удовлетворять, разделив исходную задачу на две. Первая задача является задачей Дирихле для потенциала  $V_1$  с заданием условия на границе  $\Gamma_1$  при отсутствии границы  $\Gamma_2$ :

$$V_1|_{\Gamma_1} = V_{\Gamma_1}. \quad (8)$$

Приняв рассматриваемую область определения потенциала за часть плоскости комплексного переменного

$$z = x + iy, \quad (9)$$

с помощью функции

$$\zeta = \zeta(z) \quad (10)$$

отобразим эту область на верхнюю полуплоскость нового комплексного переменного

$$\xi = \xi + i\eta, \quad (11)$$

при этом уравнение границы  $\Gamma_1$  на новой плоскости запишется так:

$$\eta_{\Gamma_1} = 0. \quad (12)$$

С помощью потенциала  $V_2$  удовлетворяем условиям (6) и (7) на границе  $\Gamma_2$ :

$$\left( \frac{\partial V_2^+}{\partial \tau} - \frac{\partial V_2^-}{\partial \tau} \right)_{\Gamma_2} = 0; \quad (13)$$

$$\left( \epsilon^+ \frac{\partial V_2^+}{\partial n} - \epsilon^- \frac{\partial V_2^-}{\partial n} \right)_{\Gamma_2} = (\epsilon^- - \epsilon^+) \frac{\partial V_1}{\partial n} \quad (14)$$

и однородному условию Дирихле на границе  $\Gamma_1$ :

$$V_2|_{\Gamma_1} = 0. \quad (15)$$

Последнему условию удовлетворяет не только функция Грина области с границей  $\Gamma_1$

$$G[\zeta(z), \zeta(z_0)] = \frac{1}{2\pi} \ln \left| \frac{\zeta(z) - \zeta(\bar{z}_0)}{\zeta(z) - \zeta(z_0)} \right|, \quad (16)$$

но и функция

$$V_2(x, y) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_{\Gamma_2} \sigma(x_{\Gamma_2}, y_{\Gamma_2}) \ln \left| \frac{\zeta(z) - \zeta(\bar{z}_0)}{\zeta(z) - \zeta(z_0)} \right| dl_{\Gamma_2}, \quad (17)$$

где  $\sigma(x, y)$  имеет смысл плотности вторичных источников, распределенных на линии  $\Gamma_2$ .

Используя известные формулы для производных потенциала  $V_2$  по обе стороны от слоя зарядов:

$$\frac{\partial V_2^+}{\partial n} = \int_{\Gamma_2} \sigma(x_{\Gamma_2}, y_{\Gamma_2}) \operatorname{grad} G \cdot \bar{n} dl_{\Gamma_2} - \frac{1}{2} \sigma(x, y); \quad (18)$$

$$\frac{\partial V_2^-}{\partial n} = \int_{\Gamma_2} \sigma(x_{\Gamma_2}, y_{\Gamma_2}) \operatorname{grad} G \cdot \bar{n} dl_{\Gamma_2} + \frac{1}{2} \sigma(x, y) \quad (19)$$

и условие (14), составляем интегральное уравнение для  $\sigma(x, y)$ :

$$\sigma(P) + \lambda \int_{\Gamma_2} \sigma(Q) K(P, Q) dl_Q = f(P), \quad (20)$$

где  $P, Q$  — точки на границе  $\Gamma_2$ ;

$$\lambda = \frac{\epsilon^- - \epsilon^+}{\epsilon^- + \epsilon^+}; \quad (21)$$

$$K(P, Q) = 2 \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n}; \quad (22)$$

$$f(P) = -2\lambda\epsilon_0 \frac{\partial V_1(P)}{\partial n}. \quad (23)$$

Решив тем или иным способом [1 и 2], интегральное уравнение Фредгольма второго рода (20), подставляем найденную плотность вторичных источников  $\sigma(x, y)$  в (17) и находим потенциал  $V_2$ , удовлетворяющий граничным условиям (13)–(15). Совокупность потенциалов  $V_2$  и  $V_1$  определяет решение исходной граничной задачи с условиями (5)–(7).

Предлагаемый подход к решению граничных задач особенно интересен применительно к плоскопараллельным и сферопараллельным полям [3], поскольку функций  $\zeta(z)$ , конформно отображающих область с границей  $\Gamma_1$  на верхнюю полуплоскость, известно очень много, а значит, известно множество выражений типа (17). При введении границы  $\Gamma_2$  следует иметь в виду, что ее точки должны находиться целиком внутри области с границей  $\Gamma_1$ .

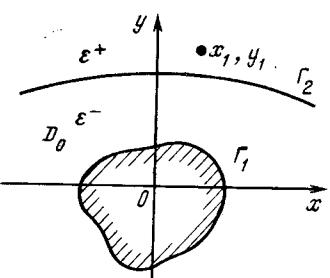


Рис. 1

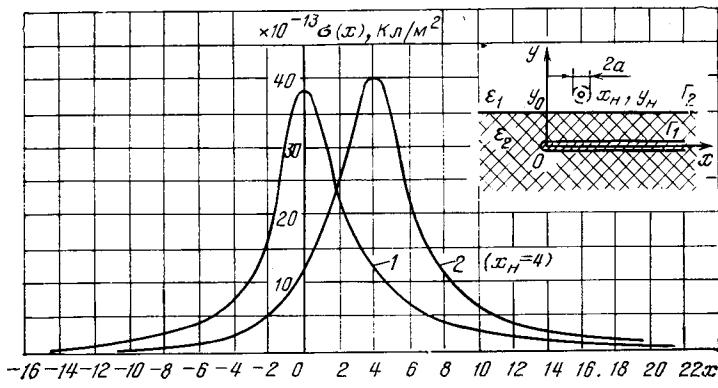


Рис. 2

Если граница  $\Gamma_2$  является бесконечной прямой, т. е.

$$y = y_0, \quad (24)$$

то уравнение (20) принимает вид:

$$\sigma(x) + \lambda \int_{-\infty}^{\infty} \sigma(x) K(x, x_0) dx_0 = f(x), \quad (25)$$

где в соответствии с (22) ядро зависит от вида функции Грина:

$$K(x, x_0) = 2 \frac{\partial G(x, y; x_0, y_0)}{\partial y} \Big|_{y=y_0}. \quad (26)$$

**Примеры. 1.** Определить потенциал поля и погонную емкость тонкого провода диаметром  $2a$ , центр которого находится в точке  $(x_H, y_H)$  при наличии заземленной полуплоскости  $y=0$  ( $x \geq 0$ ) и параллельной этой полуплоскости границы  $y=y_0$  раздела двух диэлектрических сред с параметрами  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  (рис. 2). Напряжение между электродами равно  $U_0$ .

Представим область определения потенциала  $D_0$  как плоскость комплексного переменного  $z=x+iy$  с разрезом по положительной действительной полуоси. С помощью функции

$$\zeta = \sqrt{z} = \sqrt{\rho} e^{i \frac{\varphi}{2}} \quad (27)$$

отобразим эту область на верхнюю полуплоскость нового комплексного переменного:

$$\xi = \xi + i\eta, \quad (28)$$

где

$$\xi = \sqrt{\rho} \cos \frac{\varphi}{2}; \quad (29)$$

$$\eta = \sqrt{\rho} \sin \frac{\varphi}{2}. \quad (30)$$

Подставляя (27) в (16), получаем функцию Грина области  $D_0$  в плоскости  $z$ :

$$G(\rho, \rho_0) = \frac{1}{4\pi} \ln \frac{\rho + \rho_0 - 2\sqrt{\rho\rho_0} \cos \frac{\varphi + \varphi_0}{2}}{\rho + \rho_0 - 2\sqrt{\rho\rho_0} \cos \frac{\varphi - \varphi_0}{2}}, \quad (31)$$

где

$$\rho_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}; \quad \varphi_0 = \arctg \frac{y_0}{x_0}. \quad (32)$$

Выбирая в качестве границы раздела двух сред  $\Gamma_2$  бесконечную прямую

$$y = y_0, \quad (33)$$

запишем ядро  $K(x, x_0)$  интегрального уравнения (25) в виде:

$$K(x, x_0) = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{\sin \varphi - \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} \sin \frac{\varphi - \varphi_0}{2}}{\rho + \rho_0 - 2\sqrt{\rho\rho_0} \cos \frac{\varphi + \varphi_0}{2}} - \right.$$

$$\left. \frac{\sin \varphi - \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} \sin \frac{\varphi + \varphi_0}{2}}{\rho + \rho_0 - 2\sqrt{\rho\rho_0} \cos \frac{\varphi - \varphi_0}{2}} \right]. \quad (34)$$

Потенциал электрода в виде тонкого провода, как это обычно принято, будем считать равным потенциалу поля, создаваемого нитью на расстоянии  $a$ . По условию задачи этот потенциал равен  $U_0$ , следовательно:

$$U_0 = - \frac{\tau}{4\pi\epsilon_a} \ln \frac{2\rho_H - a - 2\sqrt{\rho_H(\rho_H - a)} \cos \varphi_H}{(\sqrt{\rho_H} - \sqrt{\rho_H - a})^2}, \quad (35)$$

где

$$\rho_H = \sqrt{x_H^2 + y_H^2}, \quad \varphi_H = \arctg \frac{y_H}{x_H}. \quad (36)$$

Решение задачи Дирихле при однородном граничном условии на границе  $\Gamma_1$  может быть записано в виде

$$V_1(x, y) = B \ln \frac{\rho + \rho_H - 2\sqrt{\rho\rho_H} \cos \frac{\varphi + \varphi_H}{2}}{\rho + \rho_H - 2\sqrt{\rho\rho_H} \cos \frac{\varphi - \varphi_H}{2}}, \quad (37)$$

где

$$B = U_0 / \ln \frac{2\rho_H - a - 2\sqrt{\rho_H(\rho_H - a)} \cos \varphi_H}{(\sqrt{\rho_H} - \sqrt{\rho_H - a})^2}. \quad (38)$$

Подставляя (37) в (23), находим правую часть интегрального уравнения (25):

$$f(x) = -4\lambda\epsilon_0 B \left[ \frac{\sin \varphi - \sqrt{\frac{\rho_H}{\rho}} \sin \frac{\varphi - \varphi_H}{2}}{\rho + \rho_H - 2\sqrt{\rho\rho_H} \cos \frac{\varphi + \varphi_H}{2}} - \right. \right. \\ \left. \left. \frac{\sin \varphi - \sqrt{\frac{\rho_H}{\rho}} \sin \frac{\varphi + \varphi_H}{2}}{\rho + \rho_H - 2\sqrt{\rho\rho_H} \cos \frac{\varphi - \varphi_H}{2}} \right], \quad (39)$$

где

$$\rho = \sqrt{x^2 + y_0^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{y_0}{x}; \quad (40)$$

$y_0$  — расстояние от начала координат до границы  $\Gamma_2$  раздела двух сред.

Полученное интегральное уравнение ввиду сложности его ядра (34) не может быть решено аналитически, поэтому воспользуемся стандартной процедурой замены его системой  $n$  линейных уравнений с  $n$  неизвестными  $\sigma(x_1), \sigma(x_2), \dots, \sigma(x_n)$ :

$$\sigma(x_k) + \lambda \sum_{m=1}^n A_m K(x_m, x_k) \sigma(x_m) = f(x_k), \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (41)$$

Величины  $\sigma(x_1), \sigma(x_2), \dots, \sigma(x_n)$  являются приближенными значениями решения  $\sigma(x)$  уравнения (25) в узлах  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , где

$$x_1 = a; \quad x_2 = a + h, \dots, \quad x_n = a + (n-1)h; \quad h = \frac{b-a}{n-1}; \quad (42)$$

$a, b$  — границы интервала интегрирования, выбираются из условия малости вклада  $\sigma(x)$ ,  $x > a$ ,  $x < b$ .

Значения коэффициентов  $A_m$  при использовании формулы Симпсона ( $n=2l+1$ ), равны:

$$A_1 = A_{2l+1} = h/3, \quad A_2 = A_4 = \dots = A_{2l} = 4h/3. \quad (43)$$

Используя стандартные программы [4] решения системы линейных алгебраических уравнений, находим неизвестную плотность распределения вторичных источников  $\sigma(x)$  на границе раздела диэлектрических сред  $\Gamma_2$  при следующих значениях исходных величин:  $\epsilon_1=1$ ;  $\epsilon_2=6$ ;  $a=0,2$ ;  $y_0=2$ ;  $y_H=4$ ;  $x_H=0$  и  $x_H=4$  (рассмотрим два случая).

Графики функций  $\sigma(x)$ , определенных из (25), приведены на рис. 2; кривые 1 и 2 соответствуют случаям  $x_H=0$  и  $x_H=4$ .

Проводя численное интегрирование по формуле (17) в интервале  $[a, b]$ , где  $-a=b=25 \gg y_H$  находим величину потенциала

Таблица 1

| $x_H$ | $V_1$ , В | $V_2$ , В | $C$ , пФ/м | $C_1$ , пФ/м | $C_2$ , пФ/м | $\delta = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \cdot \%$ |
|-------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------|-------------------------------------------|
| 0     | 1         | 0,484     | 26,854     | 13,867       | 13,779       | 0,64                                      |
| 4     | 1         | 0,392     | 24,600     | 14,830       | 14,757       | 0,49                                      |

Таблица 2

| $x_H$ | $V_1$ , В | $V_2$ , В | $C$ , пФ/м | $C_1$ , пФ/м | $C_2$ , пФ/м | $\delta = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \cdot \%$ |
|-------|-----------|-----------|------------|--------------|--------------|-------------------------------------------|
| 0     | 1         | 0,250     | 17,393     | 13,045       | 12,888       | 1,2                                       |
| 1     | 1         | 0,320     | 16,255     | 11,082       | 11,028       | 0,49                                      |

на поверхности провода. Зная потенциалы  $V_1$  и  $V_2$ , находим погонную емкость  $C$  провода при наличии границы раздела двух сред:

$$C = \frac{4\pi\epsilon_{a1}B}{|V_1 + V_2|}, \quad (44)$$

а также емкость в случае однородной среды с проницаемостью  $\epsilon_{a1}$ :

$$C_1 = \frac{4\pi\epsilon_{a1}B}{V_1}. \quad (45)$$

Для сравнения была рассчитана емкость  $C_2$  такой системы проводников по формуле [5] табл. 3.9:

$$C_2 = \frac{4\pi\epsilon_{a1}}{\ln \frac{4\rho_h \sin \Phi_h/2}{a}}. \quad (46)$$

справедливо при условии  $2\rho_h \sin \frac{\Phi_h}{2} / a \gg 1$ , которое для принятых значений величин выполняется. Результаты расчетов для случая  $x_H = 0$  и  $x_H = 4$  приведены в табл. 1.

2. Определим потенциал и погонную емкость тонкого провода радиуса  $a$ , расположенного параллельно заземленному цилиндрическому проводнику единичного радиуса. Граница раздела сред с проницаемостями  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  представляет собой прямую линию  $y = y_0$  (рис. 3). Координаты оси тонкого провода  $x_H$ ,  $y_H$ , а напряжение, приложенное к электродам, равно  $U_0$ .

Рассматривая область определения потенциала  $D_0$  как плоскость комплексного переменного

$$z = x + iy, \quad (47)$$

отобразим ее с помощью функции

$$\zeta = i \frac{z - 1}{z + 1} \quad (48)$$

на верхнюю полуплоскость комплексного переменного

$$\zeta = \xi + i\eta. \quad (49)$$

Подставляя (48) в (16), находим функцию Грина области  $D_0$ :

$$G(x, y; x_0, y_0) = \frac{1}{4\pi} \ln \frac{(xy_0 - x_0y)^2 + (xx_0 + yy_0 - 1)^2}{(y - y_0)^2 + (x - x_0)^2}. \quad (50)$$

Ядро интегрального уравнения (25), составленного по прямой  $y = y_0$ , запишется в виде

$$K(x, x_0) = \frac{y_0}{\pi} \frac{x_0(x_0 - x) + (xx_0 + y_0^2 - 1)}{y_0^2(x - x_0)^2 + (xx_0 + y_0^2 - 1)^2}. \quad (51)$$

Потенциал тонкого провода связан с линейной плотностью заряда соотношением:

$$U_0 = -\frac{\tau}{4\pi\epsilon_a} \ln \frac{(x_H a)^2 + [x_H^2 + y_H(y_H - a) - 1]^2}{a^2}. \quad (52)$$

Функция  $V_1$ , являющаяся решением задачи Дирихле с одно-

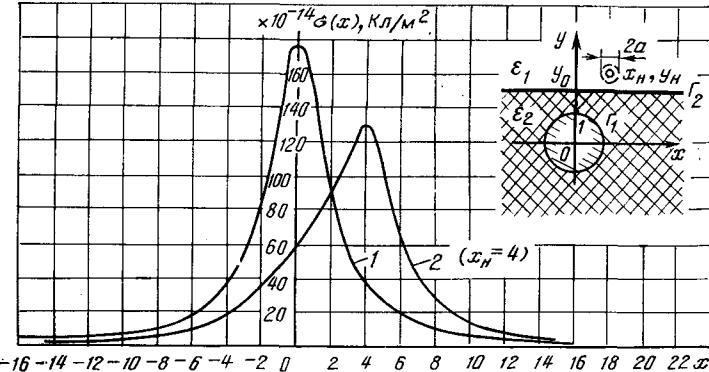


Рис. 3

родным условием на  $\Gamma_1$ , при этом приобретает вид

$$V_1(x, y) = B \ln \frac{(xy_H - x_H y_0)^2 + (xx_H + yy_H - 1)^2}{(y - y_0)^2 + (x - x_H)^2}, \quad (53)$$

где

$$B = U_0 / \ln \frac{(x_H a)^2 + [x_H^2 + y_H(y_H - a) - 1]^2}{a^2}. \quad (54)$$

Правую часть интегрального уравнения (25) с учетом (53) можно записать в виде

$$f(x) = 4\lambda\epsilon_0 B \left[ \frac{x_H(xy_H - x_H y_0) - (xx_H + yy_H - 1)y_H}{(xy_H - x_H y_0)^2 + (xx_H + yy_H - 1)^2} + \frac{y_0 - y_H}{(y_0 - y_H)^2 + (x - x_H)^2} \right]. \quad (55)$$

Как и в предыдущем примере, интегральное уравнение решалось численно для следующих значений величин:  $\epsilon_1 = 1$ ;  $\epsilon_2 = 4$ ;  $y_0 = 2$ ;  $U_0 = 1$ ;  $a = 0.2$ ; а  $x_H$  принимало два значения: 0 и

Графики зависимости  $\sigma(x)$  для обоих случаев приведены на рис. 3.

Потенциал  $V_2$  определялся по формуле (17) путем численного интегрирования. Погонные емкости при наличии границы раздела сред  $C$  и в однородной среде  $C_1$ , определялись по формуле (44), (45). Для сравнения емкость в однородной среде определялась также по формуле (3.44) [5]:

$$C_2 = 2\pi\epsilon_{a1} / \text{арч} \frac{D^2 - a^2 - 1}{2a}, \quad (56)$$

где

$$D = \sqrt{x_H^2 + y_H^2} \quad (57)$$

Результаты расчета приведены в табл. 2.

**Выводы.** 1. Предлагаемый метод решения электростатических задач в кусочно-однородных средах целесообразно применять к задачам, решенным для однородной среды, но усложненным затем путем введения одной или нескольких границ раздела диэлектрических сред.

2. Использование на границе  $\Gamma_2$  условий, более общих чем (2) и (3), позволяет учитывать анизотропные или неоднородные свойства диэлектрика.

3. Существенным упрощением является то, что интегральное уравнение составляется по прямолинейной границе раздела сред, а учет криволинейной границы электродов осуществляется с помощью функции Грина.

#### Список литературы

- Березин И. М., Жидков Н. П. Методы вычислений, т. II. М.: Физматгиз, 1960.
- Верлань А. Ф., Сизиков В. С. Методы решения интегральных уравнений с программами для ЭВМ. — Киев: Наукова думка, 1978.
- Князь А. И. Комплексные потенциалы трехмерных электрических и магнитных полей. — Киев: Вища школа, 1981.
- Краснов М. Л., Киселев А. И., Макаренко Г. И. Интегральные уравнения. — М.: Наука, 1976.
- Иоссель Ю. Я., Кочанов Э. С., Стрункий М. Г. Расчет электрической емкости. — Л.: Энергоиздат, 1981.

# Дискуссии

УДК 621.311.076.12.026.5.001.5

## О направлениях исследований в области компенсации реактивной мощности

(Статья Железко Ю. С. «Электричество» 1981, № 10)

МОЛОДЦОВ В. С., канд. техн. наук

В условиях неослабевающего интереса большого числа исследователей к задаче компенсации реактивных нагрузок (КРН) электрических сетей весьма важен периодический анализ, проводимый специалистами с целью формулировки новых задач, на решение которых должны быть направлены основные силы. Такой подход, по-видимому, и должен был бы стать предметом статьи Ю. С. Железко.

Статья Ю. С. Железко не содержит формулировки задачи КРН (почему компенсируется реактивная мощность в статье непонятно) и ее иерархической расположности в системе оптимизационных электроэнергетических задач. Помимо этого, в статье разговор ведется вообще о КРН без отношения к напряжению сети, ведомственной принадлежности и учета специфики.

Задача КРН применительно к сетям 35 кВ и выше районных электроэнергетических систем (РЭС) тесно связана с вопросами регулирования напряжения и распределения реактивной мощности, входящими в задачи регулирования параметров РЭС и их выбор при проектировании.

Задача КРН рассматривается обычно в двух аспектах [1]: технико-экономическом и экономическом. Технико-экономический аспект проблемы КРН относится к так называемой балансовой задаче, основной целью которой является обеспечение технически допустимых напряжений на зажимах электроприемников наиболее экономичным путем. Чисто экономический аспект относится к задаче, цель которой — дальнейшее повышение экономичности работы при установке дополнительных компенсирующих устройств (КУ).

Сформулированные Железко Ю. С. этапы решения задачи КРН не совсем корректны.

По Железко Ю. С. получается, что в настоящее время большинство исследователей только перебирают методы решения задачи КРН при неизменной модели, при этом для каждого метода находят процент отклонения от эталонного или близкого (по соображениям исследователя) к нему решения. Приводя этот процент, Железко Ю. С. не рекомендует заниматься четвертым этапом задачи КРН, не замечая, что исследователи в настоящее время больше занимаются третьим этапом, т. е. строят модели, обеспечивающие большую точность описания процесса по сравнению с существующими моделями. При этом следует заметить, что если решение задачи громоздко с вычислительной точки зрения или вообще неизвестно ввиду сложности модели и требований выбранного критерия или критериев, то исследователи идут на упрощение модели за счет снижения точности описания процесса.

Из сказанного следует, что опасения Железко Ю. С. насчет неправильной ориентации исследователей при решении задачи КРН весьма проблематичны.

Основной раздел статьи Железко Ю. С. «Структура и взаимосвязь погрешностей» является отправным моментом качественного и количественного анализа задачи КРН. Остановимся на этом разделе подробнее.

При выводе выражений для погрешностей Железко Ю. С. исходил из положения, которое можно пояснить следующим образом. Пусть имеем функцию:

$$u = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1)$$

При изменении значений аргументов новое значение функции определяется выражением:

$$u(1 + \delta_u) = f[x_1(1 + \delta_{x_1}), x_2(1 + \delta_{x_2}), \dots, x_n(1 + \delta_{x_n})]. \quad (2)$$

Используя выражение (2), автор обсуждаемой статьи нашел ряд соотношений вида

$$\delta_u = \varphi(\delta_{x_1}, \delta_{x_2}, \dots, \delta_{x_n}), \quad (3)$$

забыв при этом, что величина  $\delta_u$  зависит не только от векторов  $\delta_x$  и  $x$ , но и вида оператора  $f$ .

Выражения для определения предельных абсолютной  $\Delta_u$  и относительной  $\delta_u$  погрешностей имеют, согласно [2], следующий вид:

$$\Delta_u = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial u}{\partial x_i} \right| \Delta_{x_i}; \quad (4)$$

$$\delta_u = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial}{\partial x} \ln u \right| \Delta_{x_i}. \quad (5)$$

Используя выражения (4) и (5) и формулы (1), (3) и (7) обсуждаемой статьи, получим следующие соотношения для погрешностей:

$$\begin{aligned} \Delta_0 &= \frac{U^2}{2Rc_0} \Delta_{z_k} + \frac{23' k U}{2Rc_0} \Delta_U + \frac{3'_k U^2}{2R^2 c_0} \Delta_R + \frac{3_k U^2}{2Rc_0^2} \Delta_c; \\ \Delta_k &= \Delta_h + \Delta_0; \\ \Delta_3 &= \frac{2Q_k R c_{\square}}{U_2} \Delta_k + \frac{Q_k^2 c_0}{U^2} \Delta_R + \frac{Q_k^2 R}{U^2} \Delta_c + \frac{\bar{Q}_k^2 R c_0}{U_3} \Delta_U; \\ \delta_0 &= \delta_{z_k} + 2\delta_U + \delta_R + \delta_c; \\ \delta_k &= \frac{\Delta_h + \Delta_0}{|Q_h - Q_0|}; \\ \delta_3 &= 2\delta_k + \delta_R + \delta_c + 2\delta_U. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь индексы 0; з. к;  $U$ ;  $R$ ;  $c$ ;  $h$ ; 3; к относятся соответственно к величинам  $Q_0$ ,  $Q_k$ ,  $U$ ,  $R$ ,  $c_0$ ,  $Q_h$ ,  $\delta_3$ ,  $Q_k$ .

Из сказанного выше следует необходимость пересмотра количественного и качественного анализа, сделанного Ю. С. Железко в разделе «Структура и взаимосвязь погрешностей» и § 2-1 [3].

Каковы же основные направления исследований в области КРН применительно к сетям РЭС?

По моему мнению, следующие:

1. Выявление «удельного веса» задачи КРН в общей задаче выбора оптимальных параметров и структуры сети.

2. Обоснование структуры КУ с учетом надежности электроснабжения потребителей.

3. Выработка согласованных требований к моделям задачи КРН, методом ее решения и практической реализации принятого решения с учетом характера исходной информации.

4. Нахождение решений задачи КРН РЭС с учетом сетей различной ведомственной принадлежности, питающихся от нее.

Приведем результаты исследований по первому из перечисленных направлений.

Любая сложная РЭС состоит из одного или нескольких сетевых комплексов, которые содержат конечный набор сетевых модулей. Под сетевым модулем понимается элементарная сеть, состоящая из подстанции и питающей ее линии электропередачи.

Основой для построения целевой функции РЭС являются следующие принципы:

1) главный принцип — радиус действия сетевого модуля заданного напряжения — определяется величиной питаемой нагрузки, а не иерархической расположенностю подстанций РЭС, от которой он питается;

2) иерархическая структура РЭС;

3) присутствие всех стандартных ступеней напряжения в иерархической структуре электроснабжения нецелесообразно;

4) оптимальный радиус действия сетевых модулей ограничен диапазоном, имеющим для каждого напряжения свои граничные значения;

5) количество цепей от независимых источников питания (одноцепной или двухцепной вариант линий электропередач) определяется надежностью электроснабжения;

6) пропускная способность каждой цепи двухцепной линии электропередачи зависит от надежности электроснабжения;

7) мощность устанавливаемых трансформаторов и их количество зависит от требований к надежности электроснабжения.

Основным критерием оптимальности РЭС, состоящих из модулей, является минимум удельных приведенных затрат

$$\mathcal{Z}_{yi} = \frac{\mathcal{Z}_{\Sigma i}}{F_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

Суммарные приведенные затраты  $\mathcal{Z}_{\Sigma i}$  в РЭС и их площади электроснабжения  $F_i$  для  $i = 1, 2, 3, 4$ , исходя из главного принципа, определяются следующими соотношениями:

$$\left. \begin{array}{l} \mathcal{Z}_{\Sigma 1} = \mathcal{Z}_1; \\ \mathcal{Z}_{\Sigma 2} = 6\mathcal{Z}_1 + \mathcal{Z}_2; \\ \mathcal{Z}_{\Sigma 3} = 42\mathcal{Z}_1 + 6\mathcal{Z}_2 + \mathcal{Z}_3; \\ \mathcal{Z}_{\Sigma 4} = 294\mathcal{Z}_1 + 42\mathcal{Z}_2 + 6\mathcal{Z}_3 + \mathcal{Z}_4; \\ F_1 = \frac{1,5}{\sqrt{3}} l_1^2; \quad F_2 = 7F_1; \quad F_3 = 49F_1; \quad F_4 = 343F_1. \end{array} \right\} \quad (8)$$

Здесь  $l_1$  — радиус действия нижнего по напряжению модуля РЭС; большее значение  $l$ -го индекса отвечает большему стандартному напряжению модуля.

Приведенные затраты в  $i$ -й сетевой модуль

$$\mathcal{Z}_i = A_i l_i + B_{i1} S_{i1} l_i + B_{i2} S_{i2} l_i + C_{i1} S_{i1} + C_{i2} S_{i2} + D_i + (A_i + B_i Q_{ki}) E_{pi}. \quad (9)$$

В модели (9) первые три слагаемые определяют затраты в линию электропередачи, а три последующие — в подстанцию. Последнее слагаемое определяет затраты в КУ.

Выражения для вычисления коэффициентов формулы (9):

$$\left. \begin{array}{l} A_i = E_{li} a_i; \\ B_{i1} = \frac{E_{li} b_i}{\sqrt{3} U_{i1} j_i} + \frac{\sqrt{3} \rho_i \beta T}{U_i}; \\ B_{i2} = \cos \varphi_i K_{v.li} U_i; \\ C_{i1} = K_{1i} E_{pi} + K_{2i} \beta T; \\ C_{i2} = \cos \varphi_i K_{v.pi} U_i; \\ D_i = K_{3i} U_i E_{pi} + (K_{4i} U_i + K_{5i}) (N_{bi} + N_{hi}) E_{pi} + K_{6i} U_i \beta T; \\ Q_{ki} = F_i (\rho_2 \sin \varphi_i - \sqrt{\rho_2^2 - (\rho_2 \cos \varphi_i)^2}); \\ S_{i1} = \rho_1 F_i; \quad S_{i2} = \rho_2 F_i. \end{array} \right\} \quad (10)$$

В выражениях (9) и (10) приняты следующие обозначения:  $l$  — длина линии электропередачи  $i$ -го модуля;  $S_{i2}$  и  $S_{i1}$  — мощность, передаваемая по модулю соответственно до и после КРН;  $E_{li}$  и  $E_{pi}$  — отчисления на амортизацию, текущий ремонт и обслуживание для линии электропередачи и подстанции в сумме с нормативным коэффициентом эффективности;  $a_i$  и  $b_i$  — постоянная составляющая затрат и стоимость единицы сечения проводов линии электропередачи;  $\rho$  — удельное сопротивление провода;  $j_i$  — плотность тока;  $\beta$  — расчетная стоимость потерь

энергии;  $T$  — число часов в году;  $U_i$  — среднее напряжение модуля;  $\cos \varphi_i$  — коэффициент мощности нагрузки;  $K_{v.li}$  и  $K_{v.pi}$  — коэффициенты вынужденного простоя единицы длины линии электропередачи и подстанции;  $U$  — удельный ущерб от перерыва электроснабжения;  $N_{bi}$  и  $N_{hi}$  — количество выключателей, окаймляющих линию электропередачи в ее начале и конце (по направлению перетока мощности);  $Q_{ki}$  — мощность КРН, устанавливаемого на подстанции модуля;  $A_i$  — постоянная сстанавливающая затрат в КУ;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — плотность нагрузки до и после КРН.

Следует заметить, что модели (7) в силу (8) и соотношений

$$l_2 = \sqrt{7} l_1; \quad l_3 = 7l_1; \quad l_4 = 7\sqrt{7} l_1 \text{ и т. д.}, \quad (1)$$

вытекающих из главного принципа построения РЭС, являются функцией двух переменных  $l_1$  и  $p_1$ .

Таким образом, оптимальные решения для РЭС, состоящих из различного числа ступеней напряжения, отвечают в общем случае при выполнении условий

$$Q_{ki} \geq 0; \quad S_{i1} \text{ и } S_{i2} > 0; \quad l_i > 0; \quad p_1 \leq p_2 \quad (1)$$

следующей системе уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial \mathcal{Z}_{yi}}{\partial l_1} = 0; \\ \frac{\partial \mathcal{Z}_{yi}}{\partial p_1} = 0. \end{array} \right\} \quad (1)$$

Найденные из (13) оптимальные значения  $l_{1\text{опт}}$  и  $p_{1\text{опт}}$  позволяют для любого варианта организации РЭС, используя функцию (9) и соотношения (8) и (11), вычислить обобщенные показатели или, что то же, оптимальную соразмерность.

Результат расчета оптимальных РЭС с использованием изложенного подхода и применяемых при проектировании исходных данных из [4] сводится с точки зрения КРН к следующему.

1. В оптимальных РЭС с различным числом ступеней напряжения целесообразно полностью компенсировать реактивную нагрузку.

2. Эффективность КРН, определяемая снижением удельных приведенных затрат, зависит от числа ступеней сети и напряжения, а также значений целого ряда величин и колеблется примерно от 0,3 до 4,2 %. Так, оптимальное значение удельных затрат с учетом и без учета КРН в сети 35 кВ при поверхностной плотности нагрузки 0,04 МВ·А/км<sup>2</sup> составляет в среднем соответственно 0,657 и 0,671 тыс. руб./км<sup>2</sup>, а для се 35/110/220/500 кВ — 1,904 и 1,971 тыс. руб./км<sup>2</sup>.

3. Эффективность КРН растет с уменьшением поверхностной плотности нагрузки и удельной стоимости КУ, а также с увеличением числа ступеней напряжения сети, стоимости потерь энергии, удельного ущерба от перерыва электроснабжения и плотности тока.

#### Список литературы

- Молодцов В. С. Учет фактора времени в задаче компенсации реактивных нагрузок сложной электрической сети. Электричество, 1980, № 11.
- Демидович Б. П., Марон И. А. Основы вычислительной математики.— М.: Наука, 1966.
- Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности сложных электрических систем.— М.: Энергия, 1981.
- Справочник по проектированию электроэнергетических систем/Под ред. С. С. Рокотяна и И. М. Шапиро.— М.: Энергия, 1977.

~~~~~

**ЖУРАВЛЕВ В. Г., доктор техн. наук,  
АРИОН В. Д., канд. техн. наук**

Можно согласиться с мнением ряда оппонентов, что обсуждаемая статья при всех даже спорных моментах является замечательным событием. Она не только подытоживает многолетние исследования по проблеме компенсации реактивной мощности (КРМ), но и дает несколько иной подход к самой проблеме.

Автор обсуждаемой статьи переносит центр тяжести с «нахождения оптимального состояния модели» КРМ на создание математической модели (ММ) и на «практическую реализацию на

объекте результатов расчета оптимального состояния модели.

Будем для краткости называть нахождение оптимального состояния ММ оптимизационным звеном ММ, а практическую реализацию на объекте результатов расчета оптимального состояния модели — внедрением результатов.

Ю. С. Железко считает, что создание оптимизационного звена — задача математика, а создание ММ и внедрение результатов — задача специалиста в конкретной области техники. К

жалению, это не так. Отделить оптимизационное звено от самой ММ невозможно. Это ее характерная, составная часть и выбор того или иного метода оптимизации зависит от вида характеристики объекта: зависимости критерия оптимизации от управляемых параметров ММ.

В нашем случае для проектной задачи это будет зависимость приведенных затрат от мощности компенсирующего устройства (например формула (16) обсуждаемой статьи). Если эта зависимость прямолинейная, можно применять методы линейного программирования, выпуклая — методы выпуклого программирования: градиентные методы, покоординатного спуска и др. Для невыпуклых характеристик (а практически характеристики объекта чаще невыпуклые) к задаче КРМ можно применить метод полного перебора (например, по каждому узлу, где допустима установка КУ) или динамического программирования. Другие методы не гарантируют получение глобального максимума. Часто применяемое использование методов выпуклого программирования для невыпуклой задачи требует предварительного согласования характеристики объекта с методом. Несоответствие вида характеристики и оптимизационного звена всегда приводит к погрешности и часто очень заметной.

Но если бы задача сводилась только к выбору «подходящего» оптимизационного звена. В большинстве реальных случаев его приходится приспособлять к особенностям данной ММ. Например, попытаться свести невыпуклую задачу к последовательному решению серии выпуклых задач, нелинейную задачу свести к серии решения линейных и т. д.

Самая большая трудность — организовать вычисление целевой функции в форме, пригодной для оптимизационного звена, согласовать характеристику объекта с оптимизационным звеном, а для применения динамического программирования, записать целевую функцию и организовать ее вычисление в сепарабельном виде. Все это говорит о том, что в разработке оптимизационного звена такой конкретной модели как ММ КРМ требуются совместные усилия технолога и математика, а не усердие одного математика.

Теперь о внедрении результатов. Модель — это всегда упрощение. И всегда остается неуверенность, все ли гладко. Тем более, что сами оптимизационные модели часто вызывают какое-то внутреннее сопротивление инженера-практика. Он интуитивно чувствует, что предложенная ММ, несмотря на ее сложность и запутанность, «не все учитывает», а исследования в статье Ю. С. Железко подтверждают, что целевая функция «сомнительна в нынешних условиях». Положение усугубляют многие организационные трудности: разная ведомственная принадлежность сетей, разные источники финансирования и снабжения, а также трудности внедрения.

Следует, однако, обратить внимание на важный момент, выпавший из поля зрения участников дискуссии, — организация внедрения и возможности внедрения должны быть учтены в самом ММ. Математическую модель нельзя строить, не продумав всей организации внедрения. Поясним это на ряде простых примеров. Пусть решается задача оптимального распределения реактивной нагрузки между генераторами электрической станции. В распоряжении технолога есть индивидуальные характеристики каждого генератора, причем они заметно отличаются друг от друга. Технолог решает применить «строгий» алгоритм динамического программирования. Он знает, что такой подход даст ему глобальное решение. В полученном решении оптимальные нагрузки каждого агрегата отличаются друг от друга. Оптимально агрегаты станции будут загружены реактивной мощностью неодинаково. Но в распоряжении технолога есть автоматика, которая лишь уравнивает реактивные нагрузки агрегатов. Других средств реализации (кроме ручного управления) нет. Следовательно, применение этого алгоритма как раз и неэффективно из-за способа внедрения результата. Строко вычисленные нагрузки потребуется дополнительно уравнивать. При этом не будет уверенности, что состав работающих агрегатов определен правильно. Можно поступить иначе, варьируя состав работающих агрегатов, уравнивать на каждом шаге реактивную нагрузку агрегатов. Такой подход может оказаться в данном случае и более простым, и будет более эффективным, так как он соответствует практическим условиям внедрения оптимального решения.

Другой пример. Решается проектная задача выбора мест размещения КУ и их параметров. Предполагается, что регулирование мощности батареи производиться не будет. В этом случае допустим приближенный учет режима нагрузки участка сети. И наоборот, при установке регулируемых батарей режим нагрузки должен быть просчитан гораздо детальнее.

Следует обратить внимание и на другую важную методическую особенность оптимизации КУ, ускользнувшую от внимания

участников дискуссии. Обычно общую задачу КРМ делят на проектную и эксплуатационную. Такое деление важно и полезно. Но с точки зрения применимости оптимизационных методов очень важно каждую из этих задач дополнительно разделить на подзадачи — выбора состава оборудования и режимов их работы. Здесь под выбором состава понимается определение типов, мест размещения и установленных мощностей КУ — для проектной задачи, и определение состава включенных КУ (часть источников реактивной мощности можно отключить) — для эксплуатационной задачи.

Это не всегда учитываемая разница задач очень существенна. Она играет роль во многих областях техники. Дело в том, что задача выбора состава — всегда задача невыпуклого программирования независимо от характеристики объекта. Тогда как задача определения режима может быть как выпуклой, так и невыпуклой в зависимости от вида характеристики объекта.

Выпуклая задача выбора оптимального режима КУ может быть решена известными методами оптимизации режима сети по реактивной мощности, базирующимися на условии равенства относительных приростов:

$$\frac{\partial \pi}{\partial Q_i} / (1 - \sigma_i) = \text{idem},$$

где  $\partial \pi / \partial Q_i$  — относительный прирост потерь активной мощности в сети  $\pi$  при изменении реактивной мощности  $i$ -го источника;

$\sigma_i = \frac{\partial q}{\partial Q_i}$  — относительный прирост потерь реактивной мощности в сети  $q$  при изменении реактивной нагрузки  $i$ -го источника.

Задачу выбора состава и задачу выбора режима обычно пытаются решать одновременно, что сильно усложняет оптимизацию КУ.

Попытки решить невыпуклую задачу выбора состава КУ методами выпуклого программирования сильно усложняют алгоритмы или приводят к необходимости вводить ряд упрощений, например, не учитывать постоянную составляющую затрат или учитывать ее особо.

Проведенные нами многолетние исследования показали, что эффективным способом прямого (комплексного) решения задачи выбора КУ является применение аппарата динамического программирования (ДП).

Ю. С. Железко в обсуждаемой статье неоднократно пытается связать надежды преодоления трудностей задачи выбора КУ с помощью метода ДП, однако, у него верх берут сомнения относительно большой размерности задач, хотя не сказано, что понимается под задачей «большой размерности».

Отметим, что этот метод, логически очень простой и исключительно ясный по своей инженерной сути, еще мало известен инженерами, занятыми проектированием и эксплуатацией электрических сетей. Парадоксальным является, однако, то обстоятельство, что даже, если специалист не знаком вовсе с методом ДП, он уже хорошо наслышан о «проклятии размерности», хотя сегодня этим методом можно оптимально разместить КУ в электрической сети практического любого размера за приемлемое время счета.

Алгоритмы ДП чрезвычайно эффективны для расчета разомкнутых электрических сетей разных напряжений. Их сравнительная эффективность определяется следующими слагаемыми:

1. При использовании ДП полностью отпадают все известные трудности учета постоянных слагаемых в целевой функции затрат, учета дискретности шкал комплектных конденсаторных установок и реальных их стоимостей. Учет этих факторов в ДП не требует применения дополнительных алгоритмов и не является специальным актом. Заметим, что полные затраты на КУ  $Z_k$  (формула (16) в обсуждаемой статье) учитывается непосредственно, без их разбиения на постоянные, линейные слагаемые и т. п.

2. В разомкнутых сетях возможно комплексное прямое решение задач одновременного выбора оптимальных параметров сети, средств КРМ и регулирования напряжения. Это полностью устраняет трудности увязки решений по рассматриваемым частным задачам.

3. Динамическое программирование позволяет получить многовариантное решение задач, что особенно важно в условиях недостоверности исходных данных и при пологих функционалах.

Имеющийся опыт разработки программ оптимизации выбора КУ позволяет сказать, что при расчетах реальных распределительных сетей с помощью ДП никакой проблемы размерности нет. В настоящее время в Кишиневском политехническом институте практически завершена реализация упомянутой комплексной модели расчета параметров сети, средств КРМ и регулиро-

вания напряжения. Она ориентирована для работы в составе автоматизированной системы проектирования сетей в Молдавском отделении института «Сельнергопроект». Ограничения по размерности практически отсутствуют.

Что касается применения ДП к замкнутым сетям большой размерности (несколько сот узлов), отметим, что аппарат ДП органически приспособлен к реализации принципов декомпозиции и агрегирования, так как он основан на пошаговом свертывании экономических характеристик объектов.

Ю. С. Железко справедливо придает большое внимание вопросу определения стратегии ввода КУ по годам, однако при этом, на наш взгляд, он приходит к неверному выводу о том, что заданная перспектива (4—6 лет) не является достаточной для применения к решению этой задачи метода ДП (последний абзац обсуждаемой статьи перед выводами). И далее автор отмечает... «Поэтому решение целесообразно принимать на основании 4—6 расчетов, каждый из которых соответствует схеме и нагрузкам своего года». Во-первых, для применения ДП достаточно в принципе два временных интервала, во-вторых, в предлагаемой Ю. С. Железко схеме отсутствует увязка решений по годам. Думается, что и этот аспект применения ДП заслуживает внимания.

Наиболее интересная часть статьи Ю. С. Железко связана с анализом погрешности при решении и реализации задачи КРН. Но ведь большинство из называемых им факторов можно

учесть, и многие из них и учитываются даже в «классической постановке» задачи. Выявленная Ю. С. Железко большая погрешность лишь говорит о том, что эти факторы надо обязательно учитывать, причем для этого надо создавать условия для получения более представительной информации, необходимой для реализации более сложных моделей. Например, такой важный фактор как дефицит трудовых ресурсов следует учитывать в отдельной модели подсчета трудовых затрат на обслуживание конденсаторных батарей. Такая модель должна учитывать реальную сложившуюся конфигурацию электрической сети, ландшафтности, расположение на ней дорог, их состояние, расположение объектов земледелия и другое.

Учет этих факторов даст возможность строго определять расход трудовых и материальных ресурсов на переезды обслуживающего персонала от ремонтно-производственных баз к энергообъектам и КУ. Учет этого обстоятельства скажется на выборе места установки КУ, особенно при малой плотности электрической нагрузки, большой разбросанности подстанций по территории района предприятия энергосетей, при плохо развитой сети промежуточных дорог, в труднодоступных районах. При этом предложено использовать специальную модификацию алгоритма ДП. С ее помощью можно построить изолинии общих затрат при обслуживании территории с данной базы и более обоснованно размещать компенсирующие устройства, учитывая постоянное возрастающее дефицит рабочей силы.



**ТАЙЦ А. А., доктор техн. наук,  
ПРИКЛОНСКИЙ Е. Н., инж.**

В настоящее время наблюдаются определенные положительные сдвиги в направлении развития экономических проблем компенсации реактивной мощности (КРМ). Они обеспечили некоторое усовершенствование директивных и методических документов, что повысило экономический уровень электрических сетей. При этом установлена необходимость использования различных методических приемов для решения как проектных, так и режимно-эксплуатационных задач.

В итоге повышенена степень целесообразного использования наличных конденсаторных установок (КУ) в часы сниженных годовых нагрузок против условий осенне-зимнего максимума нагрузок в энергосистеме. Выявлена экономическая нецелесообразность требований полной КРМ или близкой к ней ( $\operatorname{tg} \varphi < 0,1$ ) для проектных решений, соответствующих максимальным нагрузкам.

Однако сохранились нерешенные вопросы, обсуждение которых необходимо. С этих позиций нельзя согласиться с мнением автора рассматриваемой статьи о том, что уже существует такая «классическая» постановка вопросов КРМ, которая способна положительно решать все экономические задачи, и дальнейшие исследования можно ограничить какими-то определенными рамками. Представленные в статье доказательства этого положения остаются неубедительными, так как они рассматривают лишь один способ и исследуют его теми же расчетными приемами, которые другие методы опровергают.

Исходя из этого, по нашему мнению, исследования в первую очередь необходимо направить в сторону решения следующих вопросов.

1. Проверка допустимости ориентировки на детерминированную модель сети, заданную по условиям пятого года ее развития. Она ориентирует решение примерно на первый год начала процесса окупаемости капитальных вложений в КУ, что не соответствует быстрому развитию электрических сетей и нагрузок за длительные сроки окупаемости.

Внушает сомнение допустимость нарушения элементарных положений, выдвигаемых специалистами в области экономических наук [1] и подтвержденных в [2].

В пункте 1 указано, что «расчеты экономической эффективности капитальных вложений должны производиться на 10—15 лет и более длительную перспективу», а в пункте 5 конкретизируется необходимость учета «перспективы полного завершения строительных программ».

Если электрические сети обоснованно предусматривают более существенные капитальные вложения на эту длительную перспективу, то тем более она должна учитываться в небольших вложениях в КУ.

В статье нет оценки погрешностей или экономического ущерба от нарушения этих, обычных для проектирования,

принципов технико-экономических расчетов. Имеется мнение, что ущерб при этом представляет существенную величину, так как сразу после освоения проектной мощности производств выявляются неоправданные лишние потери энергии и топлива в связи с ростом электрических нагрузок в энергосистеме. Потребитель, который точно выполнил все технические условия энергосистемы, но они были определены с нарушением принципов в части учета перспективы, вынужден оплачивать «надбавку» к тарифу за электроэнергию.

Ущерб, наносимый народному хозяйству погрешностью методики, будет продолжаться весь период организации потребителя исправления этой ошибки. При этом возникает необходимость проектирования, утверждения, финансирования, заказа изготовления и поставки оборудования, строительства, монтажа и наладки работы дополнительных КУ. При этом возникает дополнительный ущерб народному хозяйству, связанный многократным возрастанием постоянных затрат на дешевые мелкие, индивидуальные проектно-сметные и строительные монтажные работы по реконструкции только что пущенного в эксплуатацию электрохозяйства, уже находящегося под напряжением.

Если исследования в этом направлении выявят необходимость учета нормированной более длительной перспективы для выбора мощностей КУ, то следует решить вопрос допустимости учета предельного использования пропускной способности сети питания или учета влияния заданной степени КРМ на последующие капитальные вложения по их развитию. При этом в большинстве случаев рост мощности  $P$  (кВт) влияет на количественную сторону (числа элементов сети питания), а рост мощности  $Q$  (квар) влияет на качественную сторону в части их пропускной способности  $S$  (кВ·А).

2. Установление проектных экономических целей КРМ, ограничивая их узкокриммым характером, связанным с потребностями использования КУ в условиях эксплуатации сети. Целью КРМ является повышение экономичности электрических сетей, заключающейся в передаче максимальных активных мощностей при минимальных приведенных затратах. Такая трактовка прежде всего требует связи получаемых решений величиной активной мощности рассматриваемой и прочих в грузок  $P + P_{\text{пр}}$ . При этом главным является условие  $P_{\text{пр}} = \frac{P}{Q}$ . За длительные сроки окупаемости повышенные степени КРМ разгружают электрические сети от реактивных токов для замены активными. Следовательно, меняются доли затрат на капитальные вложения и возмещение потерь активной и реактивной мощности в сетях питания.

Директивные указания [3—5] требуют, чтобы «условия экономичности КУ определялись по минимуму приведенных затрат, при которых учитывались»:

затраты на КУ, коммутирующие аппараты для них, устройства регулирования мощности КУ и др.;

уменьшение стоимости трансформаторных подстанций и электрических сетей в связи со снижением токовых нагрузок;

уменьшение потерь активной и реактивной мощности в питающей и распределительных сетях и трансформаторах».

Каковы погрешности от исключения из расчетов влияния изменения капитальных вложений на пропускную способность сети и на возмещение потерь реактивной мощности в сетях питания, статья не раскрывает. Имеется мнение, что точность решения экономичности КРМ характеризуется главным образом этими исключенными составляющими затрат, так как зависимые от значения тока полные приведенные затраты на электрические сети имеют следующие слагаемые: капитальные вложения — 50%; потери энергии — 30%; потери реактивной мощности — 20%.

Мнение о том, что учет экономических последствий от КРМ на капитальные вложения в электрические сети не имеет места из-за дискретности шкалы номинальных мощностей, токов или сечений элементов сети, несостоительно. Для реальных условий, связанных с непрерывным ростом нагрузок и развитием электрических сетей КРМ приводит к замене реактивных токов активными, меняя долю капитальных вложений, приходящихся на каждого потребителя, в зависимости от задаваемых степеней КРМ. Поэтому не только дискретность, но даже неизменность сечений не является основанием к отказу учета изменяемой доли капитальных вложений в электрические сети.

Также несостотельно мнение о том, что изменение потерь реактивной мощности практически не влияет на экономичность КРМ. Для опровержения этого мнения достаточно рассмотреть соотношение величин напряжения короткого замыкания сетевых трансформаторов (10,5%) и потерь  $\Delta P_K$  (0,5%), т. е. потери реактивной мощности примерно в 20 раз выше, чем потери активной мощности, что соответствует соотношению затрат на их возмещение.

3. Установление различий в принципах минимизации суммарных затрат и в принципах определения экономической эффективности отдельной КУ. Принцип минимизации основан на приравнивании первой производной суммарных затрат, зависящих от степени КРМ, к нулю. Он требует для обеспечения точности исключения всех постоянных составляющих и, в частности, связанных с КУ ( $Z_0$ ). Эти постоянные затраты на КУ могут влиять лишь на экономическую эффективность КРМ.

Если принцип минимизации суммарных затрат определяет общие экономичные, потребляемые узлами сети реактивные мощности от энергосистемы, то экономическая эффективность КРМ должна определяться для каждой КУ отдельно и измеряться в руб/год или руб/(кВт·год). Эти задачи разные, и они не исключают друг друга.

К каким экономическим последствиям приводит объединение этих разных задач, статья не рассматривает. Однако имеется мнение, что из-за этого проектные организации часто присоединяют КУ к тем участкам сети, где они не дают эффекта, а лишь ущерб, и не используют для подсоединения КУ те участки сети, где можно получить максимальный экономический эффект. Для примера можно привести массовые проектные решения, когда КУ мощностью 150—300 квар подсоединяются к шинам 380 В комплектных трансформаторных подстанций через автоматы типа «Электрон». Между тем, в большинстве сетей питания эффект КРМ не может окупить подобную дорогую схему.

4. Определение допустимости оценки полных затрат на потери энергии в элементах сети питания, создаваемых комплексом потребителей для решения вопроса об экономичности каждой КУ, вместо определения при этом доли затрат, приходящейся на них. Имеется мнение, что недопустимо на каждого отдельного потребителя возлагать КРМ не только своей, но и прочей нагрузки ( $Q_{\text{н}} + Q_{\text{пр}}$ ). Это приводит к многократному учету одних и тех же величин потерь мощности, в то время как они одни. Установлено, что наиболее экономична такая КРМ, при которой каждый потребитель сам компенсирует свою реактивную мощность. Даже если отдельные потребители не могут осуществить КРМ, то и в этом случае нельзя, чтобы каждый потребитель ее компенсировал полностью (многократно), а необходимо лишь, чтобы на каждого приходилась только соответствующая доля.

Необходимость ориентировки на долю изменяемых от КРМ затрат при комплексных мероприятиях в электрических сетях подана пунктом 29 [2]. В этом пункте указано, что подобное распределение затрат следует осуществлять «путем отнесения на каждого участника комплекса доли затрат, определяемой пропорционально получаемому им экономическому эффекту от комплексного осуществления объекта или мероприятия».

В статье не выявлены размеры ошибки от отказа использования доли затрат вместо полных. Мнение о том, что комплексное решение экономичности КРМ одновременно во всех узлах сети системы, осуществляющее на ЦВМ, способно исключить данную ошибку, внушает сомнение. Практически невозможно подобное решение осуществить средствами ЦВМ. При всех условиях неизбежно выделение локальных зон электрических сетей. При этом обязательно в каждой локальной зоне будут протекать токи, имеющие отношение к отсекаемым участкам сети. Они сохраняют многократность учета затрат на потери энергии от токов отсекаемых участков. Таким образом, принцип учета полных затрат на потери энергии, а не доли, приводит к нарушению точности расчетов. При этом величины возникающих погрешностей в расчетах в статье не выявлены.

Принцип отказа от учета долевых составляющих затрат приводит к квадратичным зависимостям:

$$Z_c = \frac{S^2}{U^2} R_{c_0}. \quad (1)$$

При этом за счет принятия условий  $P_{\text{пр}} = \text{const}$ ;  $Q_{\text{пр}} = \text{const}$ ;  $R = \text{const}$  искусственно выделяется зависимая часть затрат:

$$Z'_c = \frac{Q^2 + 2QQ_{\text{пр}}}{U^2} R_{c_0}. \quad (2)$$

Между тем, имеется мнение, что нельзя считать  $P_{\text{пр}} = \text{const}$ , ибо цели КРМ связаны с условием передачи больших активных мощностей за счет разгрузки сетей от вредных реактивных. За длительные сроки окупаемости такая возможность всегда реализуется. Поэтому реально существует условие  $P_{\text{пр}} = \text{var}$ .

Также оспаривается условие  $Q_{\text{пр}} = \text{const}$ , так как оно приводит к искажению реальной действительности до таких пределов, что будто бы одна рассматриваемая КУ способна компенсировать всю реактивную мощность системы (как свою относительно небольшую —  $Q_{\text{н}}$ , так и огромную мощность всех прочих —  $Q_{\text{пр}}$ ).

Наконец, нельзя считать, что доля рассматриваемого тока нагрузки  $S$  занимает все полное сечение, не оставляя места для токов прочих нагрузок  $S_{\text{пр}}$ . Полное сечение элементов сети питания одновременно используется для всего комплекса токов погрузки  $S$  и  $S_{\text{пр}}$ . На ток нагрузки  $S$  приходится только доля сечения, доля проводимости и соответствующая этой доле величина сопротивления  $R_p$ . При этом от КРМ эта доля сечения снижается. Следовательно, КРМ меняет долю сопротивления:

$$R_p = R \frac{S_{\Sigma}}{S}. \quad (3)$$

Мощность  $S$ , изменяемая от КРМ, создает затраты в занимаемой ею доле сечения,

$$Z_{cp} = \frac{S^2}{U^2} \left( R \frac{S_{\Sigma}}{S} \right) c_0 = \left( \frac{S_{\Sigma}^2}{U^2} R c_0 \frac{1}{S_{\Sigma}} \right) S. \quad (4)$$

Величина, заключенная в скобках, характеризует удельные затраты на потери энергии  $Z'_{\Delta p}$ ; поэтому

$$Z_{cp} = Z'_{\Delta p} S.$$

Если величина  $S$  много меньше суммарной нагрузки  $S_{\Sigma}$ , то КРМ у потребителя  $S$  незначительно изменяет величину  $S_{\Sigma}$ , и исходная квадратичная зависимость теряется, в той или иной мере приближаясь к линейной. Если заданы предельные максимальные токовые нагрузки, соответствующие пропускной способности и  $S_{\Sigma} = \text{const}$ , то квадратичная зависимость точно заменяется линейной. Если сечения элементов сети выбираются по сниженным токам от КРМ, то квадратичная зависимость также заменяется линейной. Лишь конечные участки сети не имеют токов прочих потребителей как в настоящий момент, так и в последующем; и, если их сечение не выбирается по току, они могут сохранять исходную квадратичную зависимость затрат на потери энергии. Однако они не влияют на экономичность КРМ, так как их число мало.

Удельные затраты на зависимые части капитальныхложений, идущих на создание пропускной способности сети или доли, приходящейся на отдельный потребитель, также имеют линейную зависимость от полной мощности  $S_{\Sigma}$ .

На основании изложенного необходимы исследования новых путей упрощения математических основ КРМ за счет замены квадратичных зависимостей линейными. При этом они должны раскрывать физическую сущность КРМ более простыми мате-

матическими приемами и допускать использование простых расчетных приемов без привлечения ЦВМ. Такая возможность возникает по той причине, что исследование экономичности допустимо вести для одной точки электрической сети, и для анализа можно выделять лишь те участки сети, в которых токи текут в направлении к этой точке. Остальные участки сети, в которых токи текут к другим точкам из расчетной схемы, должны быть удалены, так как КРМ в них не снижает токов.

Максимальная точность решения экономической КРМ достигается в этом случае за счет исследований последствий снижения токов нагрузки самостоятельно для каждой группы элементов сети. Самостоятельно должны быть исследованы генераторы электрических станций, затем повышательные трансформаторы и, наконец, все последующие элементы сети отдельно (воздушные линии, сетевые автотрансформаторы, понизительные трансформаторы, реакторы, кабельные линии, трансформаторы КТП и т. д.).

Таким образом, существует широкая область технико-экономических проблем, требующих исследования, и отказ от их рассмотрения не имеет оснований.

### Список литературы

1. Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений.— М.: Экономика, 1969.
2. Методика определения экономической эффективности капитальных вложений.— Экономическая газета, 1981, январь № 2.
3. Указания по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях.— М.: Энергия, 1974.
4. Инструкция по компенсации реактивной мощности в электрических сетях.— Промышленная энергетика, 1980, № 11.
5. Инструкция по проектированию электроснабжения промышленных предприятий. СН 174—75.— М.: Стройиздат, 1976.



KERIMOV A. M., доктор техн. наук,  
ГУРФИНКЕЛЬ Е. Б., канд. техн. наук

Обсуждаемая статья формирует программу дальнейшей работы по исследованию и организации работ в области компенсации реактивных нагрузок (КРН). Предложенные в статье тезисы о направлении дальнейших исследований по КРН на новой основе с применением вероятностных методов, рекомендации по совершенствованию организации расчетов КРН и ее практической реализации перспективны и своевременны. Статья безусловно активизирует исследования в области КРН и послужит подъему их уровня. Этому должен способствовать новый, свежий подход к самой проблеме КРН с позиций сопоставления строгости постановки задач с достоверностью и объемом исходных данных, а также с требуемой точностью решения.

К сожалению, в статье Ю. С. Железко не акцентируется внимание на том, что разработанные методы решения задач КРН должны дифференцироваться в зависимости от назначения расчета.

Мы считаем, что сформулированный в статье Железко Ю. С. третий этап реализации оптимальной КРН «создание адекватной математической модели оптимизируемого явления» должен выполняться различно для всего набора необходимых для практики задач КРН:

оценка потребности в источниках реактивной мощности (ИРМ) в целом по стране;

разбивка потребности в ИРМ между энергосистемами и отраслями промышленности (для планирования выпуска и распределения ИРМ);

планирование ввода мощностей ИРМ при проектной проработке развития сетей на пятилетку;

ежегодное уточнение размещения ИРМ в сетях на основе ретроспективного анализа режимов работы сетей, потерь мощности и электроэнергии в них за истекший год.

Последние две задачи должны подразделяться на алгоритмы и программы для расчетов в питающих сетях энергосистем напряжением 110 кВ и выше, распределительных сетей энергосистем напряжением 35 кВ и ниже и в сетях промышленных предприятий.

При проектировании вновь строящихся или расширяющихся электрических сетей должны использоваться алгоритмы и программы, в которых оптимизация структуры и параметров сетей (сечений проводов, мощности трансформаторов) выполняется с учетом КРН.

Очевидно, математические формулировки вышеперечисленных задач будут разнообразны в зависимости от иерархического уровня задач и от требований к точности полученного решения. Скорее всего, не во всех случаях оправдается задание случайного характера нагрузок и ряда факторов, уточняющих решение.

Работы, обзор которых приведен в статье, накопленный опыт оптимальной КРН могут и должны быть практически использованы уже сейчас при проектировании и эксплуатации сетей энергосистем и промышленных предприятий. Для этого нужно рассмотреть возможность использования разработанных и апробированных алгоритмов и программ оптимальной КРН в детерминированной постановке, четко классифицировав их по возможности использования для решения той или иной задачи КРН из числа приведенных. Такая постановка вопроса будет способствовать дальнейшему насыщению электрических сетей источниками реактивной мощности (ИРМ) и позволит сэкономить

немало топлива до окончательного решения всех методических и организационных вопросов.

Программы оптимальной КРН выполнены различными организациями, некоторые из них предназначены для выполнения научных исследований. Поэтому должна быть проделана большая работа по доработке или реконструкции программ оптимальной КРН с целью удовлетворения единых требований предъявляемых в настоящее время к задачам АСУ во всех отношениях: унификация форм входных и выходных документов, классификация и кодирование информации, организацией внешиненного и внутримашинного информационного обеспечения.

Такую работу можно выполнить, только объединив усилия нескольких организаций при обязательной координации их работы, например, аналогично тому, как в институте «Энергосетьпроект» с участием многих его отделений выполняется разработка систем автоматизированного проектирования под руководством единого координационного центра.

Как для эксплуатационных, так и для проектных задач программы должны разрабатываться (или перерабатываться) возможностью использования информационных баз данных (ИБД). Уже сейчас практически все энергосистемы располагают ИБД для решения электротехнических задач в сетях 110 кВ и выше. Следует также ориентироваться на осуществляющееся в настоящее время развитие и внедрение АСУ предприятий электрических сетей и АСУ энергопотребления крупных промышленных предприятий. Использование ИБД сократит (или исключит) затраты времени на подготовку исходных данных специальными для задач КРН и позволит внедрить алгоритмы, максимальные использующие информацию, хранящуюся в ИБД. С другой стороны, при решении задач с использованием ИБД можно предусмотреть хранение в последних дополнительной информации, необходимой для решения задач КРМ.

Разрабатываемые или перерабатываемые программы КРН должны быть теснее связаны с техникой КРН и обладать некоторой универсальностью в отношении располагаемых средств КРН (типов и количества), коммутирующей аппаратуры и возможностей автоматизации управления ими. Например, если сеть располагает мобильными передвижными установками с возможностью изменения числа подключаемых секций батарей статических конденсаторов, вакуумными выключателями и устройствами для автоматического управления ими, можно использовать алгоритм оптимальной КРН с регулируемыми батареями конденсаторов. Удовлетворительного качества регулирования можно добиться при подключении к двум вакуумным выключателям батарей различной мощности  $Q_1$  и  $Q_2$  ( $Q_1/Q_2 = 0,6 \div 0,7$ ); ступенчатое регулирования мощности при этом будут 0,  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_1 + Q_2$ .

**Заключение.** 1. Проблема оптимальной КРН должна решаться путем создания комплекса задач различного иерархического уровня и информационной обеспеченности в соответствии с приведенной классификацией.

2. Комплекс задач оптимальной КРМ следует создать на базе существующих алгоритмов и программ с унификацией их согласно требованиям и задачам АСУ и привязкой к ИБД, в дождаясь окончания разработки новых методов расчета, усовершенствованных в свете предложений, содержащихся в статье Ю. С. Железко.

## ТАРИКУЛИЕВ И. Я., канд. техн. наук

Обсуждаемая статья охватывает широкий комплекс взаимосвязанных научно-технических задач, относящихся к теории реактивной мощности. Актуальность их решения становится все более очевидной и подтверждается прежде всего большими потерями электроэнергии в сетях из-за циркуляции реактивной мощности. Хотя решению задач в этой области в последние годы уделяется значительное внимание, уровень оснащенности отечественных электрических систем компенсирующими средствами — батареями конденсаторов (КБ) продолжает оставаться недопустимо низким. Разработанные нормативы компенсации реактивной мощности (КРМ) [1] трудно считать достаточно обоснованными. Представляется, что при правильной оценке экономической эффективности КБ может быть обоснована более высокая степень КРМ.

В [1] экономическая эффективность КБ оценивается с помощью срока окупаемости капиталовложений

$$t = \frac{K_y^{KB}}{\Delta I_{n} - I_0 - c_6}, \quad (1)$$

где  $K_y^{KB}$  — удельная стоимость КБ, руб/квар;  $I_0$  — годовые издержки на обслуживание КБ, руб/квар;  $\Delta I_n$  и  $c_6$  удельное снижение затрат на потери в сетях и удельные затраты на потери в конденсаторах соответственно руб/(квар·год).

Однако формула (1) использована не по прямому назначению, так как в соответствии с [2] формулы такого типа используются для определения срока окупаемости полных капитальных вложений в проектируемый или строящийся энергетический объект, в то время как КБ — это не строительный объект, который при вводе дает определенную продукцию (хотя в физическом аспекте генерируемую ими реактивную мощность и можно отнести к категории «продукции»), а с позиций теории экономики — сами являются продукцией производства на определенном объекте — заводе-изготовителе. Отметим, что на современном этапе производство и использование КБ имеет межотраслевой характер (так как их выпуск осуществляется в сфере Минэлектротехпрома СССР, а потребителем этого изделия, как известно, являются Минэнерго СССР и все другие отрасли народного хозяйства, связанные с потреблением электроэнергии). Поэтому, чтобы обоснованно определить срок окупаемости этих средств, необходимо учесть все реальные единовременные и текущие затраты во всех сферах их производства и использования, что совершенно не предусматривается формулой (1). Она не отражает фактические организационные процессы, происходящие на межотраслевых, отраслевых иерархических уровнях управления, связанные с определенными затратами, а поэтому непригодна для объективных экономических оценок.

В соответствии с [3] для проведения экономической оценки решения необходимо предварительно наметить возможные варианты решения. В области КРМ существует только два реальных варианта: базовый, при котором реактивная нагрузка  $Q_{\Sigma \text{наг}}$  передается потребителям от электростанций, и новый, при котором реактивная нагрузка компенсируется на месте. Базовый вариант требует отвлечения определенной доли ранее или совместно с ними осуществленных дополнительных капитальных вложений  $K_1^Q$  на генерирующие (ЭС), передающие (ВЛ) и преобразующие (П/Ст) элементы электрической системы и будут сопровождаться соответствующими ежегодными издержками на амортизацию и обслуживание этой части элементов  $I_1^Q$  и потерями электроэнергии в системе  $\Delta W_1$ ; новый вариант требует для своего осуществления предварительных научных проработок, на что, как известно, выделяются определенные единовременные затраты в объеме  $K_2^{HIP}$  что должно быть учтено в составе общих затрат этого варианта [2]. Практическая реализация этого решения требует производства средств компенсации — КБ на суммарную мощность  $Q_{\Sigma KB}$ , что связано с капитальными вложениями  $K_{2n}$  и ежегодными издержками их производства  $I_{2n}$ , а процесс оснащения узлов электрических систем конденсаторными батареями обуславливает необходимость в сфере эксплуатации единовременных затрат  $K_{2KB}$  и ежегодных текущих издержек  $I_{2KB}$ . Последние состоят из амортизационных отчислений и затрат на эксплуатацию  $I_{2KB}$  стоимости потерь активной мощности в КБ  $c_{KB}^p$  и стоимости потерь электроэнергии в электрической системе при новом распределении потоков мощностей в связи с вводом КБ (без учета потерь энергии в КБ)  $c_0^3 \Delta W_2$ .

На основании изложенного и с учетом [2 и 3] фактический срок окупаемости конденсаторных батарей может быть определен по следующей обобщенной формуле:

$$T_{\Phi}^{KB} = \frac{K_1^Q - K_2^{HIP} - K_{2n} - K_{2KB}}{I_{2n} + I_{2KB} - c_0^3 \Delta W - Q_{\Sigma \text{наг}} \sum_{a=0}^3 E_{a0}^K \sum_{y=1}^3 K_{y,k}^Q}, \quad (2)$$

где  $c_0^3$  — стоимость потерь электроэнергии, руб/(кВт·ч);  $\Delta W = \Delta W_1 - \Delta W_2$  — разность потерь электроэнергии, (кВт·ч)/год;  $\sum_{a=0}^3 E_{a0}^K = E_{a0}^{EC} + E_{a0}^{BL} + E_{a0}^{P/ST}$  — сумма коэффициентов отчислений на амортизацию и эксплуатацию элементов электрических систем (1/год);  $\sum_{y=1}^3 K_{y,k}^Q = K_{y,EC}^Q + K_{y,BL}^Q + K_{y,P/ST}^Q$  — сумма удельных стоимостей основных средств (элементов), вовлеченных в процесс генерации и передачи реактивной мощности до нагрузочных узлов электрической системы, руб/квар.

Выражая затраты в (2) через удельные параметры и суммарные мощности нагрузок  $Q_{\Sigma \text{наг}}$  и  $Q_{\Sigma KB}$  получим

$$T_{\Phi}^{KB} = \frac{\frac{Q_{\Sigma \text{наг}}}{Q_{\Sigma KB}} \sum_{y=1}^3 K_{y,k}^Q - K_{y,k}^{KB} - \frac{K_2^{HIP} + K_{2n}}{Q_{\Sigma KB}}}{\frac{I_{2n} - c_0^3 \Delta W}{Q_{\Sigma KB}} + E_{a0}^{KB} K_{y,k}^{KB} + c_0^p p_{KB} \frac{Q_{\Sigma \text{наг}}}{Q_{\Sigma KB}} \sum_{a=0}^3 E_{a0}^K \sum_{y=1}^3 K_{y,k}^Q}, \quad (3)$$

где  $E_{a0}^{KB}$  — коэффициент отчислений на амортизацию и эксплуатацию КБ, 1/год;  $K_y$  — удельная стоимость КБ, руб/квар;  $c_0^p$  — стоимость потерь активной мощности, руб/кВт;  $p_{KB}$  — удельные потери активной мощности в КБ, кВт/(квар·год).

Сравнение (1) и (3) с учетом соотношений

$$\Delta I_n = c_0^3 \Delta W / Q_{\Sigma KB}, \quad I_0 = E_{a0}^{KB} K_y^{KB} \quad \text{и} \quad C_6 = c_0^p p_{KB}$$

показывает, что в (1) не входит ряд затрат, имеющих место при решении всего комплекса задач КРМ: затраты на научные исследования  $K^{HIP}$ , капитальные вложения и текущие издержки в сфере производства КБ  $K_{2n}$ ,  $I_{2n}$ , часть капитальных вложений  $\sum_{y=1}^3 K_{y,k}^Q$  основных генерирующих, передающих и преоб-

разующих элементов систем и издержки по ним  $\sum_{a=0}^3 E_{a0}^K \sum_{y=1}^3 K_{y,k}^Q$ , вовлеченные в процесс обеспечения нагрузочных узлов реактивной мощностью.

Учитывая, что нормативный срок окупаемости  $T_{\Phi}^{KB}$  является величиной, обратной нормативному коэффициенту эффективности капитальных вложений  $E_n$  на основании (3) получим следующее выражение для годового экономического эффекта (без учета фактора времени) от внедрения в электрических системах КБ суммарной мощностью  $Q_{\Sigma KB}$ :

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{KPM}^{\text{год}} &= Q_{\Sigma \text{наг}} \left( E_n + \sum_{a=0}^3 E_{a0}^K \right) \sum_{y=1}^3 K_{y,k}^Q + c_0^3 \Delta W - \\ &- E_n (K_2^{HIP} + K_{2n}) - \\ &- Q_{\Sigma KB} (E_n K_y^{KB} + E_{a0}^{KB} K_{y,k}^{KB} + c_0^p p_{KB}) - I_{2n}, \end{aligned} \quad (4)$$

или для условий полной компенсации реактивных нагрузок узлов  $Q_{\Sigma \text{наг}} = Q_{\Sigma KB}$ :

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{KPM}^{\text{год}} &= Q_{\Sigma KB} \left( E_n \sum_{y=1}^3 K_{y,k}^Q + \sum_{a=0}^3 E_{a0}^K \sum_{y=1}^3 K_{y,k}^Q - E_n K_y^{KB} - \right. \\ &\left. - E_{a0}^{KB} K_{y,k}^{KB} - c_0^p p_{KB} \right) + c_0^3 \Delta W - I_{2n} - E_n (K_2^{HIP} + K_{2n}); \end{aligned} \quad (5)$$

$E_n = 0,15$ .

Не рассматривая здесь задачи оптимального размещения КБ в электросетях, а также влияния фактора времени на эко-

номический эффект, отметим, что годовой экономический эффект, отражаемый формулой (5), имеет тенденцию роста вследствие увеличения стоимости электроэнергии  $c_0^p$  из-за роста стоимости топлива и снижения стоимости КБ. В [4 и 5] показано, что при серийном производстве изделий их первоначальная стоимость по годам производства изменяется экспоненциально. В частности, к третьему году она снижается на 30–40 %. Учет этих временных закономерностей имеет важное значение в повышении достоверности технико-экономического анализа.

При выводе формулы (1) в [1] принималось, что снижение затрат на потери в сети

$$\Delta Z_n = (2Q_{KB}Q_{nag} - Q_{KB}^2) \frac{c_0^p R_3}{U^2}, \quad (6)$$

где  $Q_{nag}$ ,  $Q_{KB}$ ,  $c_0^p$  — суммарная реактивная нагрузка сети, мощность КБ, ее эквивалентное сопротивление и удельная стоимость потерь активной мощности в сети;  $U$  — напряжение узла, в котором размещается КБ. Однако потери в КБ

$$P_{KB} = p_{KB}Q_{KB} \quad (7)$$

увеличивают передаваемую по сети активную мощность и, если до ввода КБ потери в сети составляли

$$\Delta P' = S_1^2 R_3 / U^2 S_{nag}^2 R_3 / U^2, \quad (8)$$

где  $S_1 = S_{nag}$  — суммарная полная нагрузка электрической сети до установки КБ, то после ввода КБ

$$\Delta P'' = S_2^2 R_3 / U^2 = [(Q_{nag} - Q_{KB})^2 + (P_{nag} + P_{KB})^2] R_3 / U^2, \quad (9)$$

где  $S_2$  — суммарная полная нагрузка электросети после установки в ней КБ. После упрощения (9) с учетом (7) получим:

$$\begin{aligned} \Delta P'' = & [S_{nag}^2 - 2Q_{KB}(Q_{nag} - 2p_{KB}P_{nag}) + \\ & + Q_{KB}^2(1 + p_{KB}^2)] R_3 / U^2; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\Delta Z_n = [2Q_{KB}(Q_{nag} - p_{KB}P_{nag}) - Q_{KB}^2(1 + p_{KB}^2)] \frac{c_0^p R_3}{U^2}. \quad (11)$$

Сравнение выражений (11) и (6) показывает, что в действительности экономия затрат от снижения потерь активной мощности в сетях за счет ввода компенсирующих устройств меньше, чем определяемая по (6).

Вопросы оснащения сетей средствами измерения и учета электроэнергии, а также автоматическими устройствами управления КБ не нашли отражения в обсуждаемой статье. А между тем, очевидно, что для решения задач КРМ как на этапах научного поиска, так и практической реализации их результатов (к примеру, при внедрении и контроле соблюдения новой шкалы скидок и надбавок за КРМ) нужна объективная информация прежде всего о таких параметрах, как активные ( $P$ ,  $W_a$ ) и реактивные ( $Q$ ,  $W_p$ ) составляющие мощности и энергии различных узлов электрических систем. Необходимость обязательного наличия достоверной информации в равной степени о двухсоставляющих электромагнитной энергии и одинаковая их важность

при расчетах ее потерь в системах и разработки мер по всему ному их сокращению не могут быть поставлены вне проблем КРМ.

Единственным источником этой информации являются технические средства — измерительные приборы, преобразователи, счетчики и т. п. Однако анализ ряда энергосистем и системы электроснабжения промышленных объектов, а также номенклатура выпускаемых изделий рядом заводов Минприбора и Минэнерго СССР показывает, что как оснащенность узлов электрических систем техническими средствами целевого назначения, так и их производство на заводах для измерения реактивных параметров электроэнергии в 2–6 раз меньше, чем для ее активных составляющих. Подобный подход, который был правомерным десятки лет назад, когда нагрузки узлов электрических систем имели преимущественно активный характер, не может быть оправдан сейчас, когда около 50 % экономии топлива энергии следует достичь за счет разработки и внедрения прогрессивных удельных норм их расхода, а тем более в будущем так как темпы роста реактивных нагрузок достигают и в ряд случаев опережают рост потребления активных мощностей.

В обсуждаемой статье справедливо отмечается о факте бездействия установленных в некоторых узлах электрических систем КБ, одной из причин которого является недостаточная гибкость проектных решений. Другой причиной следует назвать неэффективность устройств автоматического управления, которых оснащаются КБ. К настоящему времени известны десятки принципов действия, структуры построения и конструктивного исполнения устройств управления, которые производятся серийно или опытными партиями. Подобное положение, увеличивающее затраты на производство и эксплуатацию этих средств создает условия для неэффективного использования установленной мощности КБ неэкономичности режимов нагрузочных узлов электрических систем и их неустойчивости. Поэтому оптимизация принципов построения и конструкций устройств автоматического управления АУ КБ по критерию минимума суммарных приведенных затрат в масштабах сфер производства и эксплуатации электрических систем имеет существенное значение. Отметим что выбранная в результате оптимизации функция автоматического управления КБ должна поддерживать в любой момент времени в узле номинальные уровни напряжения и баланс текущих значений реактивных мощностей, соответствующий минимуму потерь электроэнергии в электрической системе.

#### Список литературы

1. Железко Ю. С. Окупаемость конденсаторных установок. — Электрические станции, 1977, № 2.
2. Чернухин А. А., Флаксерман Ю. Н. Экономика энергетики СССР — М.: Энергия, 1980.
3. Падалко Л. П., Пекелис Г. Б. Экономика энергосистем Минск: Вышэйшая школа, 1976.
4. Матлин А. М. Цены и экономическая эффективность машин. М.: Машиностроение, 1968.
5. Чумаков Н. М., Серебреный Е. И. Оценка эффективности сложных технических устройств. — М.: Советское радио 1980.

~~~~~

#### МАМЕДЯРОВ О. С., канд. техн. наук

Статья Ю. С. Железко посвящена актуальному вопросу определения рациональных путей решения проблемы компенсации реактивной мощности в электрических сетях. При этом автор проводит тщательный анализ состояния этой проблемы и устанавливает, что в настоящее время большинство исследований в области компенсации реактивной мощности посвящены методическим вопросам определения оптимальных параметров объекта при наличии исходной информации в полном объеме, в то время как этапам создания адекватной математической модели и практической реализации на объекте результатов расчета уделяется явно недостаточное внимание. При этом, несмотря на наличие погрешности в исходных данных и неопределенности части исходной информации, исследователи стараются решать оптимизационную задачу по выбору мест установки и параметров компенсирующих устройств с максимально высокой точностью. Такое положение имеется и при решении ряда других задач анализа и оптимизации установившихся режимов электро-

сглаживание влияния неточности задания исходных данных на результаты расчетов и выбор рационального варианта.

Задача выбора наилучшего варианта при нескольких критериях оптимизации тривиальна только в том случае, когда наилучший вариант превосходит все остальные по всем показателям. В большинстве же практических случаев каждый рассматриваемый вариант превосходит другие по некоторым показателям и уступает им по другим. В таких случаях очень трудно сравнить альтернативные решения и выбрать наилучшее из них. Для решения задачи выбора наиболее предпочтительного решения при учете нескольких показателей целесообразно использовать теорию полезности, которая является основой теории принятия решения [2]. В частности, решение оптимизационной задачи выбора места установки и параметров регулирующих и компенсирующих устройств в электрических сетях может быть выполнено на основе методов экспериментальных оценок и факторного планирования эксперимента, позволяющих получить количественную оценку эффективности различных вариантов и найти значения факторов и параметров, близких к оптимальному, при учете наиболее значимых требований. Для решения задачи оптимального размещения регулирующих (РУ) и компенсирующих (КУ) устройств методом экспериментальных оценок необходимо четко сформулировать конечные цели. Такими целями могут быть: минимумы капиталовложений или приведенных затрат, потеря активной мощности, годовых потерь электроэнергии; ущерба у потребителей электроэнергии от некачественного напряжения; максимумы удобства эксплуатации, автоматизации управления, надежности электроснабжения, учитывающие надежность РУ и КУ; учет ограниченности КУ и др.

Важность цели характеризуется коэффициентом важности  $U_i$ . Оценка важности цели нормируется так, чтобы сумма их равнялась единице.

Для каждого рассматриваемого варианта решения необходимо дать оценку его эффективности  $e_{ki}$ , которая должна отражать степень достижения цели  $i$  при осуществлении варианта  $K$  и дается в интервале от 0 до 1. Процедура назначения оценок  $e_{ki}$  может использовать опыт экспертов, а также возможные технические и экономические расчеты.

Величина  $e_{ki}$  определяется из выражения:

$$e_{ki} = \frac{k_{\max i} - k_{ij}}{k_{\max i} - k_{\min i}},$$

где  $k_{\max i}$  и  $k_{\min i}$  — максимальные и минимальные значения параметра  $k_i$ , наблюдаемые в рассматриваемых вариантах;  $k_{ij}$  — значение параметра  $k_i$  в  $j$ -м варианте.

Общая эффективность каждого варианта  $B_j = \sum e_{kj} U_k$ . Оптимальным вариантом будет вариант с  $B_{j\max}$ .

При формировании варианта размещения РУ и КУ необходимо добиваться рассмотрения всех реально возможных вариантов. Если же количество вариантов получается очень большим, можно варианты планировать как опыты методом планирования эксперимента [3]. При этом можно получить зависимость общей эффективности от ряда факторов, характеризующих варианты размещения РУ и КУ в сети, в виде уравнения регрессии, и поиск оптимума производить методами оптимизации. Полученный при этом результат оптимизации может отличаться от варианта с минимумом приведенных затрат.

Преимущество определения оптимального варианта по оценке общей эффективности в сравнении с методом приведенных

| № п/п | $Z_{\text{пр}}$<br>тыс. руб. | $e_1$     | $e_2$     | $e_3$     | $e_4$     | $e_5$     | $B_K$ |
|-------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
|       |                              | $U_1=0,1$ | $U_2=0,1$ | $U_3=0,1$ | $U_4=0,6$ | $U_5=0,1$ |       |
| 1     | 2018                         | 0,22      | 0,32      | 0,314     | 1         | 0         | 0,685 |
| 2     | 1310                         | 0,427     | 0,765     | 1,0       | 1         | 0,5       | 0,869 |
| 3     | 1761                         | 0,994     | 0,388     | 0,490     | 1         | 0,5       | 0,807 |
| 4     | 1069                         | 0,931     | 0,895     | 1,0       | 0,65      | 1         | 0,773 |
| 5     | 2201                         | 1,0       | 0         | 0         | 0,65      | 1         | 0,59  |
| 6     | 1286                         | 0,57      | 0,76      | 1,0       | 0,65      | 0,5       | 0,673 |
| 7     | 1825                         | 0,554     | 0,378     | 0,449     | 0,65      | 0,5       | 0,578 |
| 8     | 1263                         | 1,0       | 1,0       | 1,0       | 0         | 0         | 0,2   |

затрат заключается в том, что при этом определяются относительные значения входящих в них величин, что несложно выполнить экспериментальным путем, а точность расчета здесь получается более высокой.

Проведя исследования по выбору РУ и КУ в электрической сети с четырьмя РУ и двумя КУ и приняв только три критерия оптимальности — минимумы капиталовложений, потерю электроэнергии и ущерба от отклонения напряжения от допустимого, с различными характеристиками важности цели получим, что вариант с минимумом приведенных затрат и максимумом эффективности имеет место при характеристиках важности  $U_K=0,5$ ;  $U_P=0,3$  и  $U_Y=0,2$ . Таким образом, только при определенном сочетании важностей цели максимальная эффективность и минимум приведенных затрат получаются одинаковыми.

При других характеристиках важности, например  $U_K=0,2$ ;  $U_P=0,5$ ;  $U_Y=0,3$  наибольшая эффективность получается при  $Z_{\text{пр}} > Z_{\text{прим}}$ . В таблице приведены данные об эффективности восьми рассматриваемых вариантов при пяти критериях оптимальности и расчетные приведенные затраты каждого варианта, из которой видно, что при учете важностей цели оптимальным оказывается второй вариант, а минимум приведенных затрат получается в четвертом варианте.

Как правило, важность цели, определяемая методом экспериментальных оценок, не должна быть однозначно заданной величиной, поэтому исследования по определению наибольшей эффективности должны проводиться при различных вариантах важности цели около их средних значений.

В АЗНИИ энергетики разрабатывается программа соответствующих многокритериальных расчетов с анализом их результатов для целей принятия решения по оптимальному размещению РУ и КУ в электрических сетях.

#### Список литературы

1. Веников В. А. Научно-технические исследования в области электроэнергетики (совершенное состояние и задачи).— Изв. вузов. Энергетика, 1982, № 4.
2. Теория прогнозирования и принятия решения/Под ред. С. А. Саркисяна.— М.: Высшая школа, 1977.
3. Гук Ю. Б., Лосев Э. А., Мясников А. В. Оценка надежности электроустановок.— М.: Энергия, 1974.

~~~~~

#### ПАРХАДАНОВ М. М.

В настоящее время становится очевидной неправомерность решения оптимизационных задач в энергетике с позиций детерминизма [1]. Это относится и к оптимальной компенсации реактивной мощности (ОКРМ), при решении которой вся исходная информация принимается как детерминированная. В то же время дальнейшее совершенствование «классических» методов может не дать значительного эффекта, так как последний значительно меньше ожидаемого от разработки методов, учитывающих неполноту исходной информации [2].

Детерминированная модель указанной задачи формулируется следующим образом:

$$\min [Z = f(q_1, q_2, \dots, q_n)]; \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n q_i = \sum_{j=1}^m \bar{Q}_j, \quad (2)$$

где  $Z$  — функция приведенных затрат на генерацию и распределение реактивной мощности;  $q_i$  — мощность  $i$ -го источника реактивной мощности (ИРМ);  $\bar{Q}_j$  — реактивная нагрузка  $j$ -го узла, принимаемая равной ее математическому ожиданию.

Здесь не приведены ограничения, которые могут быть учтены известными способами и не играют в данном случае принципиальной роли. В модели (1), (2) не учитывается возможный разброс значений реактивных нагрузок, поэтому в реальных условиях выбранное решение может привести к гораздо большим затратам, обусловленным реактивной мощности в сети или завышением суммарной мощности ИРМ. Отсюда необходимость придания ограничению — балансу — иного, вероятностного смысла. В связи с этим рассмотрим некоторые возможные модели задачи ОКРМ.

«Жесткая» постановка стохастической задачи ОКРМ:

$$\min [Z = f(q_1, q_2, \dots, q_n)]; \quad (3)$$

$$p \left\{ \sum_{i=1}^n q_i \geq \sum_{j=1}^m Q_j \right\} \geq p_1, \quad (4)$$

где ограничение (4) задает уровень вероятности, с которой должен выполняться баланс реактивных мощностей. Задача (3), (4) приводится к виду, подобному (1), (2), для чего из (4) находится суммарная мощность всех ИРМ  $q_{\Sigma}^*$ . При этом (4) заменяется ограничением  $\sum_{i=1}^n q_i = q_{\Sigma}^*$ .

Однако полученное решение не учитывает разброса значений отдельных нагрузок  $Q_j$ , что немаловажно. Недостатком рассмотренной модели является также то, что в ней регистрируется только сам факт нарушения баланса в сторону дефицита, в то время как важное значение имеет и величина дисбаланса.

*Двухэтапная стохастическая модель* ставит задачу минимизации математического ожидания целевой функции приведенных затрат с учетом возможных ущербов (штрафов от дисбаланса):

$$\min \{\bar{Z} = M [Z + r(\Delta Q_{\text{дб}})]\}, \quad (5)$$

где  $\Delta Q_{\text{дб}} = Q_{\Sigma n} - q_{\Sigma}$  — величина дисбаланса;  $r$  — штрафная функция:

$$r = \begin{cases} a_{\text{ш}} \Delta Q_{\text{дб}}^2 + b_{\text{ш}} \Delta Q_{\text{дб}}, & \text{если } \Delta Q_{\text{дб}} > 0; \\ c_{\text{ш}} \Delta Q_{\text{дб}}, & \text{если } \Delta Q \leq 0. \end{cases}$$

Необходимо отметить, что, говоря о дисбалансе реактивных мощностей, в данном случае подразумеваем не полное нарушение фактического баланса, а возможные отклонения нагрузки от предусмотренной планом и приводящие к значительным дополнительным затратам, связанным с дефицитом реактивной мощности  $r_1$ , или вызванным завышением плановой мощности ИРМ  $r_2$ . Представляется, что составляющей  $r_2$  в большинстве случаев можно пренебречь.

Задача (5), (6) в принципе может быть решена общими методами стохастического программирования [3], например, стохастическим квазиградиентным методом. Однако указанную модель желательно привести к одномерной путем агрегирования, для чего используем технико-экономическое эквивалентирование [4]. С этой целью определяются выражения, позволяющие, изменяя суммарную мощность эквивалентных ИРМ в наружном диапазоне, методом наименьших квадратов определять соответствующие коэффициенты. После того, как будет получена экономическая характеристика эквивалентного ИРМ, подключенного к узлу с суммарной нагрузкой, решение может производиться методами одномерного поиска.

В тех случаях, когда разброс нагрузок значителен, кривая математического ожидания затрат может иметь очень пологий характер, что говорит о большом выборе возможных решений по данному критерию. Во-первых, это обстоятельство само вызывает необходимость обращения к другим критериям, во-вторых, (что более важно) в условиях неопределенности оптимального решения имеются критерии, более приемлемые, чем математическое ожидание целевой функции. В таких условиях наибольший практический интерес представляют модели, использующие матрицу затрат, которая дает возможность обосновать выбор оптимального решения по ряду критериев. Наибольший интерес представляют следующие критерии [5].

1. Критерий Сэвиджа, по которому максимальный риск выбранного варианта должен быть минимальным среди максимальных рисков по другим вариантам:

$$\min_i \max_j \Delta Z_{ij}, \quad i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}.$$

2. Критерий Гурвица:

$$\min_i [\alpha Z_i^{\max} + (1 - \alpha) Z_i^{\min}], \quad i = \overline{1, m},$$

где  $0 \leq \alpha \leq 1$ , при  $\alpha = 1$  критерий Гурвица превращается в критерий Вальда (минимаксных затрат) при  $\alpha = 0$  — в критерий «крайнего оптимизма» (миниминный).

### 3. Математическое ожидание экономического риска:

$$\min \sum_i p_i \Delta Z_{ij}, \quad i = \overline{1, m}; j = \overline{1, m}.$$

*Выбор множества исходных вариантов суммарной нагрузки* Пусть в исходной схеме электрической сети реактивные нагрузки частично законами распределения, а частично — интегралами их возможного изменения. Во втором случае примем грузы равномерно распределенными в заданных интервалах. Характеристики и вид распределения суммарной нагрузки могут быть определены двумя способами. Первый заключается в использовании классических методов теории вероятностей. В частности, при достаточно большом числе нагрузочных узлов согласно центральной предельной теореме суммарная нагрузка распределена нормально, и параметры распределения могут быть определены аналитически. Второй подход основан на использовании метода Монте-Карло и позволяет получить статистические распределения, которые могут быть использованы в дальнейшем либо непосредственно, либо для замены их третическими распределениями.

Величины исходных нагрузок в матрице взяты как центры некоторых интервалов, вероятности попадания в которые определяются из функции распределения или гистограммы суммарной нагрузки. Рассматриваемый интервал изменения суммарной нагрузки при этом достаточно ограничить с верхней стороны «трехсигмовой» зоной.

При определении затрат, соответствующих данному варианту суммарной нагрузки, величина отклонения последней математического ожидания должна быть распределена между отдельными нагрузками пропорционально их среднеквадратическим отклонениям.

*Выбор конкурирующих вариантов суммарной мощности ИРМ* Очевидно, что оптимальная суммарная мощность ИРМ должна быть не менее математического ожидания суммарной нагрузки, так как дефицит реактивной мощности приводит к ущербу, несопоставимо большему, чем равнозначное завышение. В то же время не имеет смысла задаваться значением  $q_{\Sigma}$ , большим верхнего предела исходной нагрузки. Таким образом

$$q_{\Sigma 1} = \sum_{j=1}^m \bar{Q}_j; \quad q_{\Sigma n} = \bar{Q}_{\Sigma n} + 3\sigma_Q.$$

Разность между суммарной мощностью ИРМ и математическим ожиданием нагрузки есть ни что иное, как разница наибольее обоснованным представляется распределение этого резерва между отдельными ИРМ пропорционально среднеквадратическим отклонениям нагрузок, питающихся от них.

**Выводы.** 1. Учет вероятностного характера нагрузок в ОКРМ придает функции математического ожидания приведенных затрат очень пологий характер.

2. Не только детерминированный подход, но и принятый в качестве критерия только приведенных затрат (точнее математического ожидания) может привести к значительным народнохозяйственным ущербам.

### Список литературы

- Мелентьев Л. А. Проблема неопределенности оптимальных решений в энергетике.— Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1975, № 4.
- Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности сложных электрических систем.— М.: Энергоиздат, 1980.
- Ермолов Ю. М., Ястребский А. И. Стохастические модели и методы в экономическом планировании.— М.: Наука, 1979.
- Глазунов А. А., Гремяков А. А., Строев В. А. Технико-экономическое эквивалентирование электрических сетей задачах компенсации реактивной мощности.— Электричество, 1979, № 9.
- Беляев Д. С., Макаров А. А. Общий путь решения задач в условиях неопределенности.— В кн.: Учет неопределенности исходной информации.— Иркутск: Изд. СЭИ, 1973, вып. 5\* Вологодская областная универсальная научная библиотека www.booksite.ru

## Ответ автора

Большое количество откликов, поступивших на обсуждаемую статью, говорит о том, что поиск путей увеличения степени компенсации реактивной мощности (КРМ) в отечественных электрических сетях до экономически обоснованного уровня находится в центре внимания многих специалистов. Мнения, высказанные ими, безусловно будут способствовать более правильной ориентации научных исследований, что особенно важно для начинающих исследователей, в расчете на которых фактически и была организована эта дискуссия.

Многие участники дискуссии разделяют мнение о том, что усилия исследователей в настоящее время чрезмерно сконцентрированы на создании оптимизационных алгоритмов (четвертый этап решения оптимизационной задачи) в ущерб исследованиям на третьем и пятом этапах и целесообразно определенное их перераспределение. Однако не совсем четкая формулировка отношения автора к исследованиям, отнесенным к четвертому этапу, привела к появлению многих аргументов «в защиту четвертого этапа». Причем большинство высказанных здесь суждений практически совпадают с позицией автора, хотя внешне иногда выглядят противоположными.

Естественно, не может быть речи о «полном отрыве специалистов от самого процесса поиска решения» или «отделении оптимизационного звена от математической модели». Суть именно в гармоническом решении вопроса, которое затрудняется объективными причинами, привлекающими исследователей именно к четвертому этапу. Дело в том, что разработка оптимизационных алгоритмов и реализация их на ЦВМ доставляют гораздо большее интеллектуальное удовлетворение, чем кропотливая работа по изучению реальных условий функционирования систем, обеспеченности их метрологическими средствами, специфики взаимоотношений энергоснабжающих организаций и потребителей энергии, а также других факторов, учет которых необходим непосредственно в оптимизационной модели, как справедливо отмечают В. Г. Журавлев и В. Д. Арион и как представлял себе и автор обсуждаемой статьи, говоря о том, что вопросы формализации учета перечисленных факторов являются наиболее сложными и для своего решения потребуют наибольших усилий.

Еще сложнее обстоит дело с внедрением результатов расчета, сопровождающимся, как правило, определенным «противодействием среды». Научные работники часто склонны исключать этот этап из своих исследований, относя его к компетенции «соответствующих организаций». Действительно, нельзя требовать от исследователя, чтобы он сам устанавливал КУ в сети. Однако следует тщательно анализировать факторы, обуславливающие трудности внедрения и пытаться создавать алгоритмы, учитывающие эти трудности в самой оптимизационной модели. Для создания такой модели необходим учет не только технических факторов, но и социальных (дефицита трудовых ресурсов строительных и эксплуатационных организаций, квалификации персонала и т. п.) и географических (автор допускает, что при прочих равных условиях оптимальное число мест установки КУ в районах, например, Туркмении и Эстонии окажется различным; на необходимость учета этих факторов обращается внимание и в отклике В. Г. Журавлева и В. Д. Ариона). Для учета некоторых факторов может даже оказаться необходимым обратиться к эргологическим наукам. Соглашаясь с высказанным А. А. Глазуновым, А. А. Гремяковым и В. А. Строевым, суждением, что такие факторы, как недостоверность информации, социальная структура, не являются спецификой задач КРМ, а носят общий характер, автор не может согласиться с тем, что их не следовало бы обсуждать в рамках дискуссии по проблеме оптимальной КРМ. Технико-экономическая задача — это не просто задача, в которой технические параметры (в данном случае мощности КУ и потери) переведены в стоимостные. Системный подход предполагает рассмотрение более широкого круга факторов различной природы, а не только совместного учета сетей систем и потребителей.

Очевидно, также, что научный работник не в состоянии увеличить производство КУ на заводах, однако определить общую потребность в КУ, необходимое их годовое производство, рациональную номенклатуру — это прямая задача.

Предпочтение молодыми специалистами работ четвертого этапа, по мнению автора, объясняется и той структурой знаний, которые они получают в учебном заведении энергетического профиля: обычно это серьезная математическая подготовка, включая специальный курс математических задач энергетики (поиск оптимальных решений при заданной целевой функции)

и практическое отсутствие сведений об организационной структуре управления энергосистемами и сетевыми предприятиями, материальном снабжении, трудностях обслуживания объектов, короче говоря, о всем том, что необходимо для составления адекватной целевой функции (модели), действительно отражающей реальный технико-экономический объект.

Все это частично объясняет тот факт, что несмотря на обилие в последние 10 лет публикаций по методам поиска оптимальных решений по КРМ, попытки оценки необходимой мощности КУ в целом по стране предпринята лишь в [1], а такому важному аспекту, как разработка рациональной системы стимулирования потребителей к установке КУ (скидок и надбавок к тарифам) после дискуссии в ж. «Промышленная энергетика», 1969, № 4 были посвящены лишь три публикации [2—4], все из которых подготовлены по ВНИИЭ.

Привлечение более широкого круга исследователей к разработке позитивных предложений по упомянутым вопросам (недостатки отмечаются многими) несомненно внесло бы существенный вклад в практическое решение проблемы КРМ. Здесь же следует отметить, что разработка предложений по совершенствованию систем скидок и надбавок к тарифам должна преследовать цель ускорения установки оптимальной мощности КУ в сетях, а не некоего «справедливого» перераспределения средств между энергосистемой и потребителем. Надбавки к тарифам являются штрафными санкциями, стимулирующими доведение мощности КУ в сетях потребителей до оптимального значения, и отнюдь не призваны «компенсировать расходы энергосистемы на выработку и передачу реактивной мощности». Никакой передачей денежных сумм одним социалистическим предприятием другому нельзя скомпенсировать потери электроэнергии, являющиеся безвозвратной потерей продукта общественного производства.

Правильную формулировку оптимизационной задачи (третий этап) может дать только специалист в конкретной области техники. При четкой и полной формулировке ее в математических терминах (правильная математическая запись целевой функции и ограничений) найти оптимальное решение скорее может математик (противоположное можно утверждать лишь предполагая, что математическая подготовка математика хуже, чем технического специалиста). Однако часто математик этого решения не находит, но именно потому, что задача сформулирована специалистом либо некорректно, либо неполно (особенно в начале исследования). В процессе исследования специалист «доформулирует» задачу, чего не может сделать математик, так как не обладает достаточными знаниями о ее сущности.

Наилучшей организацией работ на третьем и четвертом этапах была бы совместная работа технического специалиста и математика, в которой первый всесторонне знал бы техническую сторону, мог составить адекватную целевую функцию (третий этап) и имел достаточные представления об оптимизационных методах, чтобы понимать действия математика, а второй свободно оперировал оптимизационными методами и имел представления о технической сути задачи. Не случайно задача понимания математиком сути решаемой им прикладной задачи ставится и специалистами математиками [5]. Именно это имел в виду автор, говоря о том, что задача четвертого этапа в основном является задачей математика.

Из этого не следует также, что автор против приложения математического аппарата к задачам КРМ. Обсуждается вопрос о наиболее нужных в настоящее время направлениях такого приложения. Точка зрения автора, сформулированная в обсуждаемой статье, состоит в том, что «в настоящее время в области поиска оптимальных решений по КРМ при заданной схеме и заданных нагрузках сети отсутствуют теоретически нерешенные и в то же время практически значимые задачи». Это отнюдь не свидетельствует о «недооценке важности правильного решения оптимизационной задачи», как считает В. Г. Пекелис. Автор как раз считает необходимым оптимизировать места установки и мощности компенсирующих устройств (КУ), однако для этого достаточно использовать уже разработанные методы, а усилия по их дальнейшему совершенствованию (в рамках классической постановки!) неоправданы. Эта точка зрения прямо поддерживается в откликах Поступова Г. Е. и др., Ковалева И. Н., Ярных Л. В. и Плотницкого А. А., Денисенко Н. А. и др., Керимова А. М. и Гурфинкеля Е. Б., Мамедярова О. С., Пархаданова М. М. Из ряда других откликов можно сделать выводы, близкие к этой точке зрения.

Вместе с тем следует подчеркнуть, что эти выводы относятся к задаче, в которой: схема сети и ее нагрузки представляются в детерминированном виде, не изменяющимися ни в течение года (за счет переключений в схеме, выводов в ремонт части оборудования, отключения некоторых станций на летний период в связи с дефицитностью используемого топлива или малой экономичностью и т. п.), ни в течение более длительного периода (за счет ввода в строй новых элементов); нагрузки рассматриваются как установленные процессы симметричного и синусоидального характера.

Автор убежден, что достигнуть значимого практического эффекта на базе совершенствования методов оптимизации в такой постановке нельзя и в качестве обоснования этого утверждения приводит количественные результаты поверочных расчетов (а не «мнение») как характеризует его В. Г. Пекелис), показывающие, что ожидать на этом пути повышения эффективности более чем на 5 % не приходится, а сама эта цифра в условиях гораздо больших отклонений, вносимых на третьем и пятом этапах, несущественна. Действительно, суммарная погрешность в первом приближении может быть определена по формуле

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_3^2 + \Delta_4^2 + \Delta_5^2}, \quad (1)$$

где индекс соответствует номеру этапа. Если  $\Delta_3 = 20\%$  и  $\Delta_5 = 20\%$  (вряд ли можно оценить их меньшими значениями), то  $\Delta_{\Sigma}$  при  $\Delta_4 = 5\%$  и при  $\Delta_4 = 0$  составляет соответственно 28,7 и 28,3 %. Следовательно, все усилия, прилагаемые для дальнейшего совершенствования решения задачи в классической постановке, имеют своей целью снижение погрешности в пределе на 0,4 %.

Вместе с тем автор допускает, что в этом обосновании что-то не учтено и за счет применения, например, методов кластерного анализа или опорных граней можно получить гораздо больший эффект, чем 5 %. Для оценки такой возможности есть четкий критерий — дополнительный экономический эффект, который может быть получен при применении предлагаемого метода по сравнению с известными. В рамках классической постановки прямая задача исследования операций (расчет приведенных затрат при заданных значениях переменных) решается однозначно. Поэтому весь «симвантический смысл компенсации» (по выражению В. Н. Казанцева) не выходит за рамки дополнительно получаемого экономического эффекта.

В соответствии с этим любая публикация должна сопровождаться, как правильно отмечает И. Н. Ковалев, числовым материалом, явно подтверждающим весомость достигнутых усовершенствований. Для этого, очевидно, требуются обязательные сопоставительные расчеты, а следовательно, предварительное изучение уже разработанных методов и, главное, анализ результатов, получаемых с их помощью для характерных случаев. Такой подход позволит несколько изменить ситуацию, при которой (по меткому замечанию одного английского социолога) авторы постепенно теряют желание изучать чужие труды, но им по-прежнему нравится публиковать свои, а также избегать случаев, когда «любая нелепость, облеченная в импозантный математический мундир, выглядит очень солидно» (Д. Шварц) [6].

Считая нецелесообразными исследования по дальнейшему совершенствованию решения в классической постановке, автор далек от мысли оценивать негативно тот вклад, который внесен исследователями в это решение. Более того, без тех результатов, которые достигнуты на этом пути (особенно следует отметить работы ростовской, минской и московской школ), вряд ли возможно было предложить переход к следующему этапу исследований, представляющему собой, по мнению автора, этап обогащения классической модели путем создания на ее базе более адекватной модели реального объекта.

Недостаточное представление о физических закономерностях оптимизационных расчетов (эти закономерности получены при исследовании задачи в классической постановке) привело, например, к появлению в [7] лишенного физического смысла требования об учете потерь реактивной мощности в стоимостном выражении, что наглядно показал И. Н. Ковалев в своем отклике. Внимательный читатель мог заметить расхождения между обоснованиями новой редакции директивной части указаний по компенсации реактивной мощности, изложенными в [3], и последовавшим в [7] ее согласованным текстом. В преамбуле к [7] пришлось указать, что дополнения, отмеченные в тексте курсивом, внесены в одностороннем порядке организацией, согласовывавшей проект.

Тем не менее в отклике А. А. Тайца и Е. Н. Приклонского в структуру затрат включены потери реактивной мощности  $\Delta Q$ . Для понимания существа вопроса необходимо четко представ-

лять, что в данном случае спор идет не по поводу того, надо и не надо учитывать  $\Delta Q$ . Безусловно, надо. Вопрос в том, как учитывать. Говоря, например, о необходимости учета напряжений в узлах, не предполагают, что киловольты надо умножить на рубли. Однако нечто аналогичное предлагается сделать потерями реактивной мощности. Хотя в данном отклике обоснований необходимости их учета в виде составляющей затрат приводится, ход рассуждений (исходя из прежних работ Е. Н. Приклонского) приблизительно такой: потери активной мощности требуют затрат в генерирующие источники, и учитываем их в стоимостном выражении. Почему же не учесть аналогичным способом потери реактивной мощности, требующие затрат в источники реактивной мощности?

Однако аналогия здесь только кажущаяся. Сама задача как раз и состоит в том, чтобы выбрать источники реактивной мощности. При прочих равных условиях в сети с большими  $\Delta Q$  окажется необходимым установить и большую мощность КУ, что и выражает в стоимостном виде различие сетей с различными  $\Delta Q$ . Добавление же в целевую функцию слагаемого  $\varepsilon_K \Delta Q$ , где  $\varepsilon_K$  — удельные затраты на КУ, приводит фактически к двойному учету затрат на КУ. Поэтому правильный учет  $\Delta Q$  состоится введением этой величины в балансовое условие, а не в целевую функцию.

Суммируя изложенное в откликах относительно учёта дополнительных факторов, выходящих за рамки классической постановки задачи оптимальной КРМ, можно сформулировать следующие актуальные направления методических разработок:

1. Учет изменяющейся топологии сети (обоснованию ей необходимости автор уделил значительное место в своей статье и указал в качестве ее основного вывода, чего В. Н. Казанцев в отклике, претендующем на объективность, не заметил).

2. Учет неопределенности ряда исходных данных, в том числе и неопределенности изменения топологии сети (здесь автор не может разделить сомнения В. Г. Пекелиса в целесообразности этого учета, так как неопределенность вносится не только ошибками в прогнозе развития сетей на два-три года вперед, требующихся для ввода КУ в эксплуатацию, но и в прогнозе на весь последующий период, в который установленные КУ могут давать эффект, существенно отличающийся от расчетного; дополнительная неопределенность обусловливается неполнотой и неточностью исходных данных о схемах и нагрузках сети). Достаточно сказать, что это не позволяет производить точные расчеты потерь энергии даже за истекший период, в котором все нагрузки уже «были», и никаких ошибок их прогноза учтывать не надо [8]). В этих условиях оценка решения по нескольким критериям одновременно (см. отклик О. С. Мамедова) приобретает еще большие основания, чем при детализированной информации.

3. Учет специфических условий работы сетей, связанных с наличием и все возрастающим весом в структуре потребления резкопеременных, нелинейных и несимметричных нагрузок, на что справедливо обращается внимание в отклике А. А. Глазунова, А. А. Гремякова и В. А. Строева и чему автор действительно уделил в основной статье всего лишь один абзац, отметив специфику, вносимую в решение задачи оптимальной КРМ подобными потребителями. Этот аспект нуждается в интенсивных исследованиях. Дело в том, что использование обычных КУ в сетях таких потребителей, с одной стороны, приводит к быстрому выходу их из строя, а с другой, — они не в состоянии полноценно выполнять функции, требуемые в этих условиях. Дополнительные затраты на установку фильтросимметрирующих устройств можно учесть в постоянной составляющей, увеличение которой может привести к невыгодности установки КУ в данном узле, если она определяется только влиянием на потери. Вместе с тем отказ от КРМ в данном узле может оказаться недопустимым по техническим условиям. В результате системное решение по КРМ для такой энергосистемы (а описанные условия следует уже рассматривать как типовые) не может быть получено только по экономическим критериям, а требует одновременного учета технических ограничений как по напряжению, так и по остальным показателям качества электроэнергии.

Весьма перспективным для таких потребителей является применение специальных статических компенсирующих устройств различных типов (сконструированных на основе преобразовательной техники или насыщающихся реакторов). За рубежом эти устройства получили широкое распространение — достаточно сказать, что суммарная мощность их в сетях всех стран в настоящее время превышает 5 млн. квт и на очередные 7 млн. квт размещены заказы на заводах электротехнических фирм [9]. В нашей стране практическое внедрение таких устройств находится в самой начальной стадии, несмотря на отечественный приоритет в разработке теоретических основ их создания.

Многофункциональность этих устройств и преимущества их эксплуатации при правильной оценке безусловно оправдывают их более высокую по сравнению с обычными КУ стоимость, что неоднократно отмечал проф. В. А. Веников. Кроме того, начальная стоимость нового устройства не может являться критерием для решения вопроса о целесообразности его внедрения. Достаточно привести, например, тот факт, что при росте спроса на обычные конденсаторные установки во Франции за 10 лет (с 1960 по 1970 гг.) цена их упала с 44 до 11,5 франка за квадратный метр [10].

С позиций рассматриваемого вопроса — совершенствования методов выбора КУ — приведенный выше материал показывает, что эти методы должны учитывать нетрадиционные для них факторы, обусловленные как новыми условиями потребления энергии, так и новыми средствами их нормализации.

4. Одновременный выбор всего комплекса мероприятий по снижению потерь электроэнергии в сетях [11], в том числе регулирующих и компенсирующих устройств и элементов самой схемы, необходимость чего отмечается во многих откликах. Причем это необходимо даже в классической постановке задачи без учета изложенного выше в пп. 1—3.

Значимость влияния неопределенности исходной информации на оптимальность принимаемых решений автор пытался проиллюстрировать зависимостями погрешностей различных характеристик оптимальных решений от погрешностей исходных данных. Эти зависимости определены отдельно для каждого фактора и на примере простой схемы, содержащей лишь одно сопротивление. Естественно, что их численные значения не могут быть показательными для случая комплексного воздействия всех факторов в сложных схемах, на что справедливо указывают А. А. Глазунов, А. А. Гремяков, В. А. Строев и В. С. Молодцов. Автор и не ставил цели дать в статье метод расчета интервалов неопределенности затрат в реальных схемах, а хотел лишь обосновать необходимость его разработки.

В. С. Молодцов сделал попытку дать зависимости для комплексного воздействия всех факторов, хотя тоже для простой схемы. Выведенные им выражения (6) для относительных погрешностей (в основной статье они обозначены через  $\Delta$ , у В. С. Молодцова —  $\delta$ ) прямо сводятся к выражениям основной статьи при приравнивании нулю погрешности всех факторов, кроме рассматриваемого, что опровергает утверждение автора отклика о том, что автор основной статьи «забыл» о зависимости погрешности от вида оператора  $f$ . Некоторые отличия выражений (6) при сведении их к однофакторным от формул основной статьи обусловлены приближенностью использованных В. С. Молодцовым формул (4) и (5), вывод которых в [12] произведен при допущении, что производными, квадратами и высшими степенями погрешностей можно пренебречь. Вместе с тем, следует отметить, что полученные В. С. Молодцовым выражения характеризуют суммарную погрешность, вносимую факторами, действующими в одном направлении. В действительности результирующая погрешность будет много меньше вследствие взаимной компенсации составляющих. Практически приемлемое выражение можно получить, используя аппарат теории вероятностей.

Для получения выражения (8) автором основной статьи не совсем корректно использовано выражение (7), верное только в точке оптимума. На самом деле выражение (8) не должно иметь второго слагаемого и иметь вид  $\Delta_3 = 2\Delta_k$  или с учетом (5)  $\Delta_3 = -2\Delta_h/\psi$ , что соответствует формуле (11) отклика Н. А. Денисенко, И. Гофманна и В. В. Каминского. Численно эта некорректность мало влияет на результат (при тех же исходных данных  $\Delta_3 = 0,4$  вместо приведенного 0,44). Эта погрешность характеризует отличие эффекта, фактически получаемого при установке КУ выбранной мощности от его расчетного значения, обусловленное ошибками определения расчетных нагрузок. В упомянутом отклике дан более детальный смысловой анализ понятия погрешности практического эффекта. Действительно, расчетный эффект является прогнозируемым значением эффекта, а действительный ущерб народного хозяйства от реализации неточного решения определяется его отличием от точного решения, которое могло быть получено при фактических нагрузках. Эта погрешность определяется выражением (8) отклика. Следует отметить, что эта погрешность асимметрична: она резко возрастает при  $\Delta_h < 0$ , т. е. в случае завышения расчетных нагрузок (что бывает чаще всего). Так, при  $\Delta_h = -0,1$  и  $\psi = 0,5$   $\Delta_\Phi = 6,7\%$ , в то время как при  $\Delta_h = 0,1$   $\Delta_\Phi = 2,9\%$ . Еще более резко  $\Delta_\Phi$  возрастает при снижении  $\psi$ .

В откликах В. Г. Пекелиса, А. А. Тайца и Е. Н. Приклонского рассматривается влияние КУ на пропускную способность сети и способы его учета. Рассмотрим подробнее вопрос о целесообразности такого учета.

Как известно, затраты на потери мощности и энергии определяются по формуле

$$Z_{\Pi} = \alpha \Delta P_m + \beta \Delta W, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — удельные затраты на 1 кВт потерь мощности в максимум нагрузки —  $\Delta P_m$ ;  $\beta$  — удельные затраты на выработку 1 кВт·ч энергии (топливная составляющая), потери которой составляют  $\Delta W$ . Величина  $\alpha$ , в свою очередь, состоит из суммы затрат в электрические станции на 1 кВт установленной мощности и аналогичных затрат на сеть (руб/кВт передаваемой мощности):

$$\alpha = \alpha_{ст} + \alpha_{сет}, \quad (3)$$

где вторая составляющая обычно не превышает 20—30 % первой. Существующая методика определения стоимости потерь предусматривает соответствующее увеличение  $\alpha_{сет}$  для учета сетевой составляющей, что и сделано при определении численных значений замыкающих затрат [13]. Вместе с тем, такой способ позволяет учитывать лишь ту часть снижения затрат на сеть, которая обусловлена снижением активной мощности за счет уменьшения  $\Delta P_m$ . Пропускная же способность сети определяется полной мощностью.

Удельное увеличение пропускной способности (кВт/квар)

$$q = \frac{\partial S}{\partial Q} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}, \quad (4)$$

а при малых значениях  $\operatorname{tg} \varphi$  (при учете только потерь  $\operatorname{tg} \varphi$  целесообразно снижать до 0,2—0,3)  $q \approx \operatorname{tg} \varphi$ . Удельная стоимость дополнительной пропускной способности (руб/кВт)

$$k_{пр} = k_k / \operatorname{tg} \varphi. \quad (5)$$

Принимая среднюю стоимость КУ  $k_k = 7$  руб/квар и учитывая, что удельная стоимость сетей всех напряжений в целом по стране не превышает 45 руб/кВт, получим, что с помощью КУ повышать пропускную способность выгоднее, чем с помощью дополнительного сетевого строительства до  $\operatorname{tg} \varphi = 7/45 = 0,16$ . Ниже этого значения  $k_{пр} > 45$  руб/кВт.

Исходя из этого результата, следует, что учет влияния КУ на пропускную способность сети увеличивает целесообразную степень КРМ, приводя к увеличению оптимальной оснащенности сетей КУ почти на 0,1 кварт/кВт по сравнению с полученной по критерию потерь [1]. Сомнения в достоверности этого вывода вызывает лишь смысловая сторона такой характеристики сети, как пропускная способность. В отличие от генерирующих источников, имеющих четкие пределы по активной мощности, превышение нагрузки над которыми приводит к необходимости строительства новых станций, линий электропередачи могут «пропускать» энергию при плотности тока в 3—4 раза больше экономической (техническим пределом являются токи, длительно допустимые по нагреву). Все экономические последствия этого состоят лишь в повышенных потерях.

По сравнению с таким запасом пропускной способности, практически никогда не используемым, так как условия целесообразности разгрузки сети за счет строительства новых линий (по критерию тех же потерь!) наступают раньше, чем может возникнуть желание повысить пропускную способность сети за счет установки КУ мощностью, большей, чем оптимальная по потерям, предельно возможное повышение пропускной способности

$$\delta S = (\sqrt{1 + 0,25^2} - 1) \cdot 100 \approx 3\%$$

выглядит практически незначимым. Этот вывод не полностью применим к трансформаторам, однако и они обладают существенной перегрузочной способностью.

Следует также отметить, что при мощности КУ, оптимальной по критерию потерь, ограничения пропускной способности по режиму напряжения практически никогда не возникают (см. § 2-3 [14]).

Вопросы учета постоянных составляющих затрат на КУ рассматриваются в нескольких откликах. Известно, что строгое решение этой задачи теоретически обеспечивается методом динамического программирования (ДП). Практическая же его реализация в виде рабочей программы для ЦВМ осуществлена пока лишь для разомкнутых сетей. Автор склонен разделить оптимизм В. Г. Журавлева и В. Д. Ариона по поводу применимости метода ДП к расчетам и сложнозамкнутых сетей, считая вместе с тем, что наилучшим его подтверждением была бы разработка соответствующей рабочей программы.

Все остальные методы, кроме ДП, основаны на общем допущении: замене поиска оптимального сочетания КУ, затраты на которые содержат постоянные составляющие, оценкой окупаемости последних. Эти условия нельзя считать теоретически адекватными. Известно, например, что окупается любая мощность КУ в интервале  $0 \leq Q_k \leq 2Q_{k0}$ , где  $Q_{k0}$  — ее оптимальное значение [14]. Поэтому в рамках принятого допущения приходится вводить дополнительные критерии, «выводящие» экономически приемлемое решение (с окупающимися капиталовложениями) как можно ближе к оптимальному (с минимальными приведенными затратами). Такие критерии применены, например, в [15]. В шаговом методе [16] даны противоположные рекомендации. Так, считается достаточным учитывать эффект «не обязательно полностью, а лишь в объеме, соответствующем окупаемости этой КБ». Очевидно, что число окупающихся постоянных составляющих больше их оптимального числа, поэтому шаговый метод приводит к большему числу рекомендуемых мест установки КУ и меньшему эффекту, чем [15]. Допущенная И. Н. Ковалевым арифметическая ошибка во втором варианте расчета (правильные значения в строке  $OP$ :  $Q_{k1}=0$ ;  $Q_{k2}=-1,5$ ;  $3=10,75$  и погрешность шагового метода не 64%, а 29%) не меняет сути дела.

Вместе с тем, представляется, что использование таких терминов для характеристики методов, как «принципиальная неправильность», «несостоятельность», иногда применяемых авторами, может неправильно ориентировать читателя. Может создаться ощущение, что лучше вообще не выбирать КУ, чем выбирать их так охарактеризованным методом. На самом деле оказывается, что эффект от использования такого метода на 10–15% меньше, чем от «принципиально правильного». Указанная разница достаточно значима, чтобы предпочесть второй метод, однако первый может быть при этом охарактеризован лишь как менее точный. Следует также отметить, что несмотря на то, что шаговый метод дает менее эффективные решения, чем метод [15], численные значения погрешностей, приведенные в отклике И. Н. Ковалева, нельзя считать характеризующими действительные погрешности шагового метода в практических расчетах, так как примеры рассчитаны для отвлеченных численных данных.

Излишние споры о преимуществах и недостатках методов часто возникают из-за того, что сами авторы не всегда объективно характеризуют их. Так, шаговый метод более прост, чем [15], что достигается снижением точности расчета. Однако в [16] он характеризуется как равнозначный по точности с существующими методами, хотя результатов сопоставительных расчетов и указаний о том, с какими конкретными методами он сравнивался, не приводится. В отклике Г. М. Калялова и В. В. Теребаева простота шагового метода подчеркивается. Однако тут же следует фраза о близости его методу ДП. Зная о методе ДП, читатель скорее всего подумает, что шаговый метод дает практически то же решение, что и метод ДП, да еще и более простым путем. Более глубокий анализ не подтверждает такого вывода.

**Декомпозиция и эквивалентирование.** Ввиду того, что энергетические системы сложны (а рассматриваемые совместно с сетями предприятий тем более), значительное место в ряде откликов отведено вопросам декомпозиции и эквивалентирования сетей. Здесь мнения специалистов не всегда совпадают. Так, И. Н. Ковалев утверждает, что при определении оптимальных значений реактивной мощности, передаваемой в сеть потребителя, достаточно учитывать лишь параметры сети системы. Л. В. Ярных и А. А. Плотницкий считают, что учитывать сеть 6–10 кВ нужно, но не во всех случаях и предлагают критерии для выделения этих случаев.

Для подтверждения своей точки зрения И. Н. Ковалев приводит соотношения удельных приростов потерь в питающих и распределительных сетях для средних условий передачи мощности по питающей сети, отражаемых коэффициентами  $\beta_{12}$  и  $\beta_{22}$ . Прежде всего следует отметить, что допустимость неучета для средних условий не означает допустимости его во всех случаях. Выявить же те узлы, в которых сети 6–10 кВ допустимо не учитывать, можно только после решения задачи оптимальной КРМ с учетом постоянной составляющей (см. § 2-2 [14]). В результате решения задачи определяются узлы, в которых сети 6–10 кВ можно было не учитывать, но эта информация уже не имеет практического значения. В то же время учет этих сетей в виде  $R_\vartheta$ , определяемых не по схеме сети, а по ее обобщенным параметрам [14], требует весьма незначительных трудозатрат.

Л. В. Ярных и А. А. Плотницкий предлагают осуществлять декомпозицию сетей (разделение их на части, для которых задачи КРМ можно решать отдельно), причем эквивалентированию подвергаются не разомкнутые, а замкнутые сети. Если осуществлять такое эквивалентирование по предлагаемому выражению (4), то, по мнению автора основной статьи, смысл

эквивалентирования как действия, упрощающего решение задачи, пропадает. Для получения (4) нужно многократно рассчитать потери энергии в сети, представленной полной схемой при различных сочетаниях нагрузок в узлах, аппроксимировать полученные зависимости и затем использовать их в расчете. Легче один раз использовать полную схему непосредственно в оптимизационном расчете. Опасения же о большой погрешности эквивалентирования распределительных сетей не имеют достоверных оснований. Легкость получения зависимостей  $R_\vartheta = f(Q_k) = \phi(Q_{bx})$  для разомкнутой сети объясняется тем, что эта зависимость однопараметрическая в отличие от приведенного отклике выражения (4). Погрешность аппроксимации затрат сети 35–110 кВ полиномом второй степени не превышает 0,7% (см. § 4-4 [14]).

Свертывание сетей 35–110 кВ путем предварительного расчета их по полной схеме существенно снижает объем решаемой задачи оптимальной КРМ в сети в целом и в то же время практически приемлемо в связи с гораздо меньшим числом таких сетей по сравнению с числом сетей 6–10 кВ, с одной стороны и (что более важно) наличием информации о их схемах и нагрузках у организаций, производящей расчет (энергосистемы). Эквивалентирование таким образом сетей 6–10 кВ требует энергоснабжающей организации нереально больших трудозатрат и вряд ли осуществимо. Вместе с тем «пессимистическая оценка» относится в основной статье не к исследованиям тип [17 и 18], а к такой организации расчетов. По мнению автора в практических расчетах было бы целесообразно использовать обобщенные зависимости затрат, предварительно рассчитанные для выборки сетей по методикам [17 и 19] и затем представляемых в виде функций легко получаемых обобщенных параметров сетей. Это позволило бы использовать их в системном расчете вместо применяемого в настоящее время  $R_\vartheta$ , отражающего только потери, не увеличивая объема необходимой информации.

В целом же в отношении декомпозиции сетей автор считает более перспективным использование методов оптимизации больших систем, что совпадает с точкой зрения Ю. М. Тюханова и В. Н. Усихина. В соответствии с этим подходом координирующая задача решается для объединения подсистем, представляющими собой все сети, подлежащие учету, представленные в расчете моделями, отражающими технические особенности режима работы сетей каждой группы и их информационное обеспечение. Затем решается задача для каждой подсистемы в отдельности с сохранением значений параметров на границах с другими подсистемами. В нормативном документе [20] рекомендуется, например, делить сети на пять групп, представляемых в расчете различными моделями:

- Линии сверхвысокого напряжения, возможности передачи реактивной мощности по которым определяются в основном режимами этих линий, а не требованиями приемной и передающей систем.

- Межсистемные связи 110–220 кВ, а также связи более высокого напряжения, если изменение передаваемой по ним реактивной мощности возможно в достаточно широких пределах в зависимости от требований, обусловленных режимами приемной и передающей систем.

- Замкнутые сети 110 кВ и выше, не входящие в группы 1 и 2.

- Разомкнутые сети 35–110 кВ.
- Сети 6–20 кВ.

**Методы выбора мощности и мест установки КУ в промышленных сетях** теоретически не отличаются от методов системного решения. Более того, появляющееся на этой стадии дополнительное балансовое условие в виде заданного значения входной мощности еще более сужает возможности полученных решений, далеко отступающих от оптимума, что наглядно показано Ю. М. Тюхановым и В. Н. Усихиным путем вывода критериального уравнения (18). Это подтверждает оценки, сделанные в § 3-3 [14]. Основная задача здесь состоит в правильном учете постоянных составляющих затрат и возможностей снижения суммарной мощности трансформаторов.

Повышенное внимание в основной статье к практической стороне проблемы КРМ обусловлено и тем обстоятельством, что многочисленные методические разработки до сих пор привели к оснащению энергосистем и проектных организаций рабочими программами расчетов даже на базе детализированной постановки, что справедливо отмечается в отклике Г. Е. Поспелова, В. Т. Федина, В. Г. Прокопенко и А. М. Кермова, Е. Б. Гурфинкеля. Отсутствие расчетов оптимальных входных мощностей в условиях действия прейскуранта, основного на их наличии, заставляет рекомендовать для временно использования средние их оценки [20]. При создании программ подобных расчетов необходимо учитывать требования, предъявляемые

ляемые совместностью работы различных программ в рамках информационно-вычислительных систем. Возможно, при этом придется пересмотреть критерии эффективности вычислительных алгоритмов оптимальной КРМ, так как создание специальной сетевой модели для задачи КРМ может оказаться нецелесообразным при наличии в составе информационно-вычислительных систем несколько худшей (с позиций задачи КРМ), но универсальной модели, реализованной в программах расчета и оптимизации рабочих режимов. Ориентация на эти программы требуется и для совместного выбора регулирующих и компенсирующих устройств (см. отклик Г. Е. Постпелова, В. Т. Федина и В. Г. Прокопенко).

Наибольшей эффективности этой работы можно достичь только при соответствующей ее координации. Это соображение послужило основанием для включения в [20] пункта 1.10, рекомендующего согласовывать с головной организацией техническое задание на разработку программ расчета оптимальной КРМ.

**Заключение.** Несмотря на широту дискуссии, ряд вопросов оказался за ее пределами. Следует, например, согласиться с В. Н. Казанцевым в том, что важны работы по повышению надежности установок и с В. Г. Пекелисом в том, что для промышленных сетей важной является задача создания системы автоматического управления мощностью КУ, единичные установки которых разбросаны по различным местам сети и регулируются по локальным параметрам, а обеспечить они должны заданное значение входной мощности. Однако эти задачи выходят за рамки дискуссии, посвященной методам выбора КУ.

Не все вопросы, поставленные участниками дискуссии, смогли быть полноценно рассмотрены в ответе автора. В частности, заслуживают внимания соображения И. Я. Тарикулиева об оценке эффективности использования КУ (хотя они далеко не бесспорны, так как сводят оптимизационную задачу к проверке окупаемости затрат; в [1] показано, что полная КРМ окупается с запасом, но это не оптимальное решение), предложения М. М. Пархаданова по способам решения задачи в условиях неопределенности, О. С. Мамедярова по учету многокритериальности, Ю. М. Тюханова и В. Н. Усихина по учету ресурсных ограничений при оптимизации больших систем и другие.

Изложенный в ряде откликов материал трудно поддается анализу. Это относится, в частности, к изложенным в отклике В. С. Молодцова принципам построения РЭС [формулы (8) и далее], которые без пояснений и ссылок на литературу выглядят напечатанными скорее для автора, чем для читателей, и к значительной части отклика А. А. Тайца и Е. Н. Приклонского, в котором ряд утверждений трудно отнести к какой-либо конкретной методике, другие утверждения свидетельствуют о неправильной трактовке требований нормативных документов и весьма упрощенном представлении о режимах работы замкнутых сетей.

В целом же представляется, что дискуссия оказалась очень полезной. Автор благодарен всем специалистам, высказавшим свое мнение по поводу целесообразных направлений исследований в области оптимальной КРМ. Отраден тот факт, что при этом удалось сформировать достаточно общую точку зрения, что позволяет надеяться на повышение вклада теоретических исследований в практическое решение проблемы КРМ в ближайшем будущем. Автор также принимает к сведению рекомендации В. С. Молодцова о том, какой подход «должен был бы стать предметом статьи» и постарается в следующих работах разъяснить «почему компенсируется реактивная мощность».

## ОТ РЕДАКЦИИ

Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов является одной из наиболее важных задач энергетики. Известно, что в настоящее время не более 20–30 % потенциала энергии, содержащейся в энергетических ресурсах, используется в виде «полезной» энергии потребителем. Почти 15 % общих потерь энергии приходится на потери электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям.

Снижение этих потерь до экономически обоснованного уровня — важная народнохозяйственная задача. Одним из наиболее эффективных способов снижения потерь является компенсация реактивной мощности, поэтому редакция считает своевременной дискуссию о целесообразных направлениях дальнейших исследований в этой области. Методы выбора мощности и мест установки компенсирующих устройств должны обеспечить наиболее эффективное их использование на практике, что возможно лишь при учете всего комплекса факторов, определяющих условия

## Список литературы

1. Железко Ю. С. Окупаемость конденсаторных установок.— Электрические станции, 1977, № 2.
2. Копытов Ю. В., Карпов Ф. Ф., Железко Ю. С. Шкала скидок и надбавок к тарифам на электроэнергию за компенсацию реактивной мощности.— Промышленная энергетика, 1975, № 6.
3. Железко Ю. С. Анализ опыта применения новых нормативных документов по компенсации реактивной мощности.— Промышленная энергетика, 1980, № 10.
4. Железко Ю. С. Стимулирование рационального потребления реактивной мощности с помощью тарифов на электроэнергию.— В кн.: Совершенствование тарифов на электрическую и тепловую энергию.— М.: Изд. Минэнерго СССР, 1982.
5. Грекова И. Методологические особенности прикладной математики на современном этапе ее развития.— Вопросы философии, 1976, № 6.
6. Веников В. А. Моделирование больших систем электроэнергетики.— Электричество, 1978, № 5.
7. Инструкция по компенсации реактивной мощности в сетях потребителей электроэнергии.— Промышленная энергетика, 1980, № 11.
8. Железко Ю. С. Интервалы неопределенности расчетных значений потерь электроэнергии в сетях.— Электричество, 1982, № 10.
9. Gavrilovic A. Thyristor and variable static plant for a. c. and d. c. transmission.— Electrical Review, 1981, № 12.
10. LeGal G., Canal M. Methode pour une planification optimale de la compensation de l'énergie réactive sur les réseaux de distribution.— AIM Liege.— CIRED, 1971, 13 mai.
11. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем/Под ред. В. Н. Казанцева.— М.: Энергоиздат, 1983.
12. Демидович Б. П., Марон И. А. Основы вычислительной математики.— М.: Наука, 1966.
13. Справочник по проектированию электроэнергетических систем/Под ред. С. С. Рокотяна и И. М. Шапиро.— М.: Энергия, 1977.
14. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах.— М.: Энергоиздат, 1981.
15. Ковалев И. Н., Татевоян Г. М. Один из методов компенсации реактивных нагрузок в электрических сетях.— Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1974, № 5.
16. Каялов Г. М. Шаговый метод расчета компенсации реактивных нагрузок в промышленной электрической сети.— Электричество, 1978, № 11.
17. Глазунов А. А., Гремяков А. А., Строев В. А. Технико-экономическое эквивалентирование электрических сетей в задачах компенсации реактивной мощности.— Электричество, 1979, № 9.
18. Ковалев И. Н. Два метода расчета компенсации реактивных нагрузок в электрических сетях.— Электричество, 1973, № 10.
19. Ковалев И. Н., Сидельников В. И. Структура компенсации реактивных нагрузок в проектируемой промышленной электросети.— Электричество, 1981, № 9.
20. Инструкция по системному расчету компенсации реактивной мощности в электрических сетях/Министерство энергетики и электрификации СССР.— М.: Изд. СПО Союзтехэнерго, 1981.

работы энергосистем: ограничений, накладываемых на объемы выделяемых средств, неполноты информации о схемах и нагрузках сетей, различия режимов потребления энергии различными типами электроустановок, их влияния на качество электроэнергии и т. п.

Дискуссия показала, что несмотря на ряд различных точек зрения по методам исследований специалисты признают, что эффективность исследований в этой области необходимо оценивать тем практическим эффектом, к которому они приводят.

Редакция, соглашаясь с этой точкой зрения, заканчивает обсуждение статьи Ю. С. Железко. Учитывая важность наилучших подходов к решению задачи компенсации реактивной мощности в электрических сетях, редакция предполагает в будущем публиковать работы этого направления, особенно учитывающие многофакторность задачи и решающие ее с позиций системного анализа.

# Библиография

УДК [538.56+538.3](07)(049.3)

## КУХАРКИН Е. С. Инженерная электрофизика. Техническая электродинамика

Под ред. П. А. Ионкина. Изд. 2-е. — М.: Высшая школа, 1982

Сравнивая второе издание рецензируемого учебника с первым, вышедшим в 1969 г., необходимо отметить, что они существенно отличаются, хотя их общая структура осталась без изменений. Это вполне естественно, так как принципиальные физические основы данной дисциплины не претерпели изменений за это время, но появилось много новых приборов и устройств. В этом смысле выход существенно переработанного учебника следует считать полезным и своевременным.

Рецензируемый учебник состоит из трех разделов и 12 глав.

Первый раздел «Электромагнитные явления в неоднородных изотропных линейных средах» состоит из четырех глав.

В гл. 1 «Отражение, преломление и интерференция электромагнитных волн» сначала рассматриваются общие понятия об однородных и неоднородных плоских волнах, их поляризации, законах отражения и преломления, соответствующих коэффициентах, волновых матрицах и графах. Анализируются важные частные случаи — полное прохождение, полное отражение, приближенные граничные условия Щукина—Рытова—Леонтического. Далее автор переходит к интерференции электромагнитных волн и к некоторым техническим использованию этого явления — так называемым неотражающим покрытиям, голограммии, ее применением в дефектоскопии и вычислительной технике.

В гл. 2 «Стоячие электромагнитные волны и объемные резонаторы» автор кратко излагает общие принципиальные понятия, а затем переходит к анализу явлений в объемных резонаторах и некоторым их применениям, например, для точных измерений диэлектрической проницаемости. Глава заканчивается представлением поля в резонаторе в виде набора гармонических осцилляторов, описываемых классическими уравнениями Гамильтона.

Гл. 3 «Направляемые волны и волноводы» начинается с общих свойств направляемых электромагнитных волн, после чего сравнительно кратко рассматриваются прямоугольные, круглые и полосковые металлические волноводы. Затем автор переходит к диэлектрическим, оптическим и пленочным волноводам, включая некоторые элементы волноводной оптики. Далее излагаются методы учета неоднородностей в волноводах, согласование с нагрузками, а также применение волноводов в измерительной технике СВЧ.

В гл. 4 «Излучение и дифракция электромагнитных волн» излагаются ставшие классическими основы теории антенн и дифракций. Более подробно рассматриваются дифракционные явления в оптических системах обработки информации. Новым является подход к дифракционным явлениям, основанный на общем решении волнового уравнения и рассмотрении волнового поля как фильтра пространственных частот с соответствующими импульсной и частотной характеристиками. Это позволило автору в сжатой и доступной форме изложить основы теории современных аналоговых оптических вычислительных машин.

Второй раздел «Электромагнитные явления в анизотропной линейной среде» состоит из трех глав.

В гл. 5 «Электромагнитное поле в немагнитных диэлектриках» прежде всего водится понятие о тензоре диэлектрической проницаемости, рассматриваются особенности распространения и преломления электромагнитных волн в анизотропной среде. Далее анализируются электрооптические эффекты в жидкостях, твердых и жидких кристаллах, рассматривается использование их в ячейках Керра и Покельса, модуляторах света, в том числе пространственных.

В гл. 6 «Электромагнитное поле в гиротропной среде» рассматриваются электромагнитные свойства ферритов и тензор магнитной проницаемости. Описываются волновые эффекты в гиротропных средах, в частности, невзаимные явления в волноводах с ферритами и их применения в технике СВЧ.

В гл. 7 «Электромагнитное поле в проводящей движущейся среде» выводятся основные уравнения магнитогидродинамики, объясняются явления «вмороженности» и «диффузии» магнитного поля в проводящие среды, магнитное давление и магнитогидродинамические волны. Рассматриваются принципы действия электромагнитных насосов, ускорителей и МГД-генераторов.

Раздел третий «Электромагнитные явления в нелинейных средах и устройствах» состоит из пяти глав и занимает более половины всей книги.

В гл. 8 «Электромагнитные явления в сегнетоэлектриках» приводятся основные сведения о сегнетоэлектричестве как физическом явлении. Рассматриваются вариконды и их характеристики, а также применение сегнетоэлектриков в оптическом диапазоне и на СВЧ. Фотосегнетоэлектрическим явлением в оптически управляемым пространственно-временным модуляторам отведены специальные параграфы.

Гл. 9 «Электромагнитные явления в ферромагнетиках» посвящена магнитным планкам с плоскостной и нормально-анизотропией. Излагается теория цилиндрических магнитных доменов, рассматриваются явления при записи информации на магнитных пленках под термическим воздействием электронного или лазерного луча, магнитооптический эффект Керра и свойства магнитооптической бинарной голограммы.

Гл. 10 «Электромагнитные явления в полупроводниках» начинается с рассмотрения гальваномагнитных явлений, связанных с движением свободных носителей заряда в электрическом и магнитном полях. Значительное внимание в дальнейшем изложении обращено на физические явления в характеристиках для молекулярной электроники функциональных монолитных интегральных схемах и их использование в полупроводниковом фильтре и диоде Ганна. Далее излагаются оптические свойства полупроводников, магнитооптические явления, эффект фотонного давления, внутренний фотоэффект, фотопроводимость, оптически управляемые пространственные транспаранты на основе МДПДМ-структур и жидких кристаллов, а также различные виды электролюминесценции. Эти явления позволяют познакомить читателя с принципами действия полупроводникового оптического модулятора, светодиода, фотодиода (солнечной батареи) и оптрана. Логическим завершением и итогом этой обширной главы является введение в интегральную оптоэлектронику, представляющую качественно новый скачок развития современной микроэлектроники.

В гл. 11 «Электромагнитные явления в сверхпроводниках» автор кратко напоминает о природе и общих физических свойствах сверхпроводников. Далее рассматриваются магнитные свойства сверхпроводников первого, второго и третьего ряда: слабосвязанных сверхпроводников (эффекты Джозефсона) и использование в квантовых интерферометрах уникальной чувствительности и криогенных элементах ЭВМ (криотронах квантронах).

Гл. 12 «Электромагнитные явления в активных средах» посвящена основам квантовой электроники. Выводятся уравнения движения дипольного перехода и резонансных процессов. Рассматриваются квантовые усилители и генераторы, в том числе инжекционные лазеры и полупроводниковые лазеры накачкой электронным лучом. Глава заканчивается краткими сведениями о применении лазеров и оптоэлектроники в вычислительной технике.

Проф. Е. С. Кухаркиным написана фундаментальная книга, охватывающая и систематизирующая огромный и весьма разнообразный круг вопросов. Учебник написан хорошим языком, каждый раздел книги изложен лаконично и четко, без ненужных подробностей. Книга примечательна и тем, что является первым учебником по инженерной электрофизике и принадлежит пятым авторам первого курса «Техническая электродинамика». Известно, что создание учебников по новым техническим дисциплинам находящихся на стыке разных наук, это не только тяжелый труд, требующий высокой эрудиции и кругозора, но и творческий процесс.

От классических работ по электродинамике (И. Е. Тамм, Л. Д. Ландау и Е. М. Лившица, Д. А. Стрэттона, В. Смай и др.) учебник отличается тем, что в нем наряду с физическими явлениями показываются их технические приложения, дают инженерные решения. Правильность выбранного автором направления подтверждается появлением (после первого издания его работы в 1969 г.) ряда книг с таким же методическим решением, хотя и с иной ориентацией: В. И. Вольман и Ю.

Пименов (1971 г.); И. А. Семенов (1973 г.); Я. Туровский (1974 г.)

Существенное расширение во втором издании книги разделов, посвященных явлениям в полупроводниках, оптическим явлениям, методам и приборам информации, основам квантовой электроники, отвечает поставленной XXVI съездом партии задаче повысить технический уровень приборостроения на основе новейших достижений микроэлектроники, оптоэлектроники и лазерной техники. Поэтому рассматриваемый курс технической электродинамики является не только перспективным научным направлением, но и имеет важное народнохозяйственное значение.

Вместе с тем необходимо сказать, что предметы электрофизики и технической электродинамики не всегда понимаются однозначно. Так, содержание книг Г. Мирделя «Электрофизика» (1972 г.) и Я. Туровского «Техническая электродинамика» (1974 г.) заметно отличается от рецензируемой. Если отвлечься от того, что книга является учебником для определенной инженерной специальности, должна удовлетворять программе определенного учебного курса и базируется на предшествующем курсе физики твердого тела и плазмы, включающего фундаментальные разделы теоретической физики, то может возникнуть удивление, что в ней не затрагиваются такие фундаментальные вопросы электрофизики, как, например, анализ электропроводности металлов на квантовом уровне, связь скорости дрейфа свободных электронов с плотностью тока, взаимосвязь макроподходов к электромагнитным явлениям. В этом случае в книге по инженерной электрофизике следовало бы уделить определенное внимание статическому электричеству и мерам борьбы с этим опасным явлением, а также больше внимания уделить электретам.

Подробные предложения возникают по причине того, что автор в предисловии слишком лаконично определил направле-

ние основной инженерной ориентации учебника и не пояснил связь своего курса с другими книгами по электрофизике и технической электродинамике, вышедшими после первого издания учебника. Специфику книги можно было бы более четко отразить в названии, второго издания, которое в настоящей редакции кажется нам чрезмерно расширенным.

Необходимы более подробные пояснения автора в предисловии или введении относительно структуры учебника. Например трудно отнести к разделам автоматики, информационно-измерительной и вычислительной техники основы магнитной гидродинамики и принципы действия МГД-генераторов, изложенные в гл. 7, если не обратить внимания на лаконичную фразу на с. 212 об использовании э. д. с. магнитогидродинамического происхождения для возбуждения оптических квантовых генераторов. Вместе с тем было бы, конечно странно, если бы инженер-электрофизик, окончивший энергетический или политехнический институт, ничего не слышал о методах прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, используемых в МГД-генераторах.

В списке литературы (67 названий, все на русском языке), как нам кажется, кроме упомянутых выше книг Г. Мирделя и Я. Туровского, следовало бы указать также книги: М. Миллер «Голография» (1979 г.), А. Н. Губкин «Электреты» (1978 г.) и, возможно, другие.

Несмотря на все эти замечания, высокая оценка учебника, высказанная выше, остается в силе. Следует одобрить работу автора и издательства по выпуску и полезной книги, которой будут пользоваться не только студенты, но и многие специалисты.

**КАГАНОВ З. Г., доктор техн. наук,  
БЕЛЫЙ М. И., доктор техн. наук**

УДК 621.374(07)(049.3)

## ШНЕЕРСОН Г. А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. — Л.: Энергоиздат, 1981

Техника получения сильных импульсных токов и магнитных полей, быстро развивающаяся в последнее время, ставит сложные задачи перед специалистами в этой области. В книге проф. Г. А. Шнеерсона рассматриваются электромагнитные явления, происходящие в мощных разрядных цепях, приводятся основные соотношения, поясняющие физический смысл этих процессов, дается большое количество расчетных формул, применяемых в инженерной практике. Последнее приближает рецензируемую книгу к хорошему справочнику.

Первая глава книги посвящена расчетам полей протяженных проводников при резко выраженным поверхностном эффекте. Автор дает богатый справочный материал, охватывающий основные конфигурации проводников, используемых в цепях с малоиндуктивными емкостными накопителями энергии. Особое внимание уделено особенностям поля на кромках электродов; приведены асимптотические формулы для напряженности поля вблизи прямоугольных кромок. На основе разработанного автором метода сшивания рассчитана индуктивность прямоугольных шин, разделенных узким изолационным зазором. Приведены также формулы, позволяющие для ряда конкретных систем рассчитать сопротивление проводников при высокочастотном токе и переходное сопротивление при резко выраженным поверхностном эффекте.

Вторая и третья главы книги посвящены различным методам расчета магнитных полей в соленоидах типичных конфигураций и содержат результаты конкретных расчетов. В третьей главе приведен большой справочный материал, который позволяет рассчитать поле и найти интегральные параметры уединенных одновитковых соленоидов, а также соленоидов, расположенных соосно с проводящими телами или вблизи проводящей плоскости. Для этих конфигураций, широко используемых в устройствах с импульсными магнитными полями, приведены как упрощенные формулы, так и более точные выражения, в которых краевые эффекты учтены методом сшивания. Решения многих задач даются впервые.

В четвертой главе рассмотрены процессы, сопутствующие проникновению магнитного поля в проводящие тела. Наряду с задачами нестационарного поверхностного эффекта в полу-пространстве и плоском слое, приведены решения задач, связанные

с проникновением поля через плоские и цилиндрические экраны.

Пятая глава книги посвящена изложению теории переходных процессов в цепях емкостных и индуктивных накопителей энергии, содержащих массивные проводники и нелинейные элементы (сопротивления со степенной зависимостью проводимости от тока; сопротивление, растущее по линейному закону от поглощенной энергии). Значительная часть этой главы содержит описание процессов в цепях ускорителей рельсового типа, в которых проводящее тело ускоряется электромагнитными силами. Полученные автором результаты широко используются разработчиками соответствующих устройств.

Рецензируемая книга интересна также в методическом плане. Автор в полной мере использовал при ее написании свой опыт преподавания студентам ЛПИ им. М. И. Калинина курса «Сильные электромагнитные поля».

Книга не лишена, к сожалению, некоторых недостатков. В ней, на наш взгляд, недостаточно освещены вопросы расчетов токораспределения в плоских элементах емкостных накопителей энергии, а также вопросы, связанные с получением импульсных магнитных полей методами магнитной и магнитодинамической кумуляции. Следует отметить, что в других своих работах автор затрагивал эти проблемы, поэтому отсутствие их в книге объясняется, по-видимому, ее ограниченным объемом.

Таким образом, рецензируемая книга является ценным и полезным пособием как для студентов-электрофизиков и студентов, изучающих технику сильных токов и магнитных полей, так и для специалистов, получивших хорошее справочное пособие. Кстати, малый тираж (1380 экз.) сделал книгу сразу же после ее выхода библиографической редкостью. Учитывая важность содержащегося в рецензируемой книге материала, желательно ее переиздание в дополненном виде и большим тиражом.

**БОНДАЛЕТОВ В. Н., доктор техн. наук,  
ВОЛКОВ Н. Б., канд. техн. наук**

УДК [621.316.91+621.316.99]:061.3

## Теоретические и электрофизические проблемы растекания токов в мощных заземляющих устройствах в многолетнемерзлых грунтах районов Крайнего Севера

(Расширенное заседание IV секции «Теоретические проблемы электрофизики высоких напряжений «Научного Совета АН СССР по комплексной проблеме «Научные основы электрофизики и электроэнергетики», 23—26 ноября 1982 г., Норильск)

В работе заседания приняли участие около 150 представителей из 30 организаций страны. Были заслушаны и обсуждены более 60 научных докладов и сообщений по вопросам заземления и грозозащиты электроустановок в условиях многолетнемерзлых грунтов.

Вопросы, рассмотренные на заседании, имеют большое народнохозяйственное значение для развития и надежной работы промышленности и энергосистем северных и восточных районов страны. Тематика докладов логически продолжала и развивала вопросы, поднятые в 1980 г. на конференции в г. Апатиты, посвященной грозозащите и заземлению в районах с высоким удельным сопротивлением грунта.

За время между двумя заседаниями IV секции проведена большая работа по исследованию заземления электроустановок, а также перенапряжений в сетях в условиях многолетнемерзлых грунтов. Разработаны уточненные методы расчета и предложены усовершенствованные схемы грозозащиты линий, подстанций и электрических машин высокого напряжения с использованием новых защитных аппаратов. Разработана и внедрена новая аппаратура для измерения параметров молний и уточнены характеристики распределения амплитудных токов. Выполнены новые исследования в области использования рельсовых путей как элементов грозозащиты устройств электроснабжения железнодорожных потребителей. Рассмотрены особенности применения различных способов защиты оборудования карьерных сетей от коммутационных перенапряжений. Проведен большой объем теоретических и экспериментальных исследований заземляющих систем и устройств в многолетнемерзлых грунтах, позволивший перейти к созданию руководящих технических материалов по проектированию, сооружению, эксплуатации и контролю заземляющих устройств.

Обсуждались доклады и сообщения по следующим направлениям.

Вопросы заземления электроустановок в районах с многолетнемерзлыми грунтами. Интенсивное развитие промышленности северных и северо-восточных районов страны обуславливает бурный рост энергетических мощностей. В то же время широкое распространение многолетнемерзлых грунтов, сложность геоэлектрических структур и изменение их характеристик в зависимости от сезона определяют необходимость серьезного изучения проблемы обеспечения надежной работы энергосистем и электробезопасности установок в этих районах.

Для решения комплекса вопросов проектирования заземляющих устройств необходимо располагать методиками расчета сосредоточенных и протяженных заземлителей. Такие методики разработаны в настоящее время рядом организаций и периодически проходят экспериментальную проверку.

В условиях многолетнемерзлых грунтов предпроектные изыскания для определения электрической структуры грунта в месте сооружения заземлителя весьма трудоемки. В частности, по трассе БАМ такие изыскания осложняются сложными природно-климатическими условиями, где имеют место скальные и многолетнемерзлые породы, каменистые и галечные грунты, покрытые слоем торфа и наносных отложений глубиной до 70 см. Удельное сопротивление земли на глубине 1÷3 м в летнее время года колеблется в широких пределах от 200 до

5000 Ом·м. Поэтому может оказаться целесообразной предложенная уточненная методика расчета удельного сопротивления грунта по его физическим параметрам (дисперсности, засоленности, количеству незамерзшей воды).

В докладах рассмотрены методы расчета распределения потенциала вдоль оси протяженного заземлителя в многолетнемерзлой структуре с непрерывным законом изменения удельного сопротивления земли. Однако отмечалось, что методика расчета протяженных заземлителей требует дальнейшей доработки, систематизации имеющихся экспериментальных и расчетных данных, дальнейшей разработки упрощенных расчетных соотношений, учитывающих многообразие элементов естественного заземления.

Подтверждена прямыми натурными измерениями пригодность методики расчета сопротивления растеканию железобетонных фундаментов для условий многолетнемерзлых грунтов при удельном сопротивлении грунта до 20 кОм·м. Показано, что железобетонные фундаменты способствуют выравниванию потенциалов на поверхности земли. Однако в период оттаивания верхнего слоя земли такое выравнивание незначительно. В ряде докладов рассматривались вопросы использования рельсовых путей в качестве естественных заземлителей.

Опыт эксплуатации электроустановок в условиях многолетнемерзлых грунтов убедительно доказал, что проектирование заземляющих устройств целесообразно выполнять на основе допустимых значений напряжения прикосновения с учетом параметров электрической структуры верхних слоев грунта.

Как показывают исследования, даже достаточно высокий уровень токов короткого замыкания не вызывает появления опасных перенапряжений на заземлителях подстанций, расположенных на территориях крупных промышленных предприятий, обладающих развитием естественным заземлением. Тем не менее остается проблема ограничения выноса потенциала на удаленных подстанциях, которая может быть решена либо в комплексе с вопросами выбора рационального напряжения и их конструктивного оформления. В частности, перспективно является разделное выполнение заземления на высокой и низкой сторонах с выносом заземляющего устройства из зоны распределения заземлителя на высокой стороне.

Вопросы заземления неотделимы от проблемы пожаро-взрывоопасности в связи с выносом потенциала и отсосом токов однофазного короткого замыкания в подземные выработки и трубопроводы с горючими жидкостями и газами.

Большой интерес вызвали доклады, посвященные особенностям связей электрофизиологических параметров организма человека с динамикой процессов высшей нервной деятельности в условиях Крайнего Севера. Отмечено наличие сезонных изменений электрических параметров человека, что должно учитываться в оценке допустимых напряжений прикосновений и токов.

Грозозащита электроэнергетических объектов в районах с многолетнемерзлыми грунтами. В докладах, посвященных этому вопросу, единодушно отмечалось отсутствие в существующих ПУЭ обоснованных норм и рекомендаций по обеспечению грозозащиты электрических сетей в районах с многолетнемерзлыми грунтами. Для обоснования таких норм признано целесообразным обобщить опыты эксплуатации энергосистем северных и восточных районов страны, разработать уточненные методы расчета грозозащиты подстанций, линий и электрических машин с учетом высокого удельного сопротивления грунта. Были обсуждены проблемы глубокого ограничения перенапряжений, использование для этой цели защитных аппаратов базе высоконелинейных оксидноцинковых резисторов, рассматривались требования к таким аппаратам для разных видов сетей среднего класса напряжения, а также оценивалась пропуск-

способность аппаратов и их возможные вольт-амперные характеристики.

С ростом масштабов освоения районов распространения многолетнемерзлых грунтов все более актуальной становится задача определения для этих районов параметров молний, используемых в расчетах грозозащиты. Это связано с тем, что параметры молний, в частности амплитуда тока, зависят от географических и климатических характеристик местности, которые в настоящее время не учитываются из-за отсутствия экспериментальных данных.

На основании результатов измерений амплитуды тока молний в различных странах установлено, что среднее значение логарифма амплитуды тока молний уменьшается с увеличением географической широты. Следовательно, для северных районов распределение амплитуд токов молний должно быть сдвинуто в сторону меньших значений амплитуд. Увеличение удельного сопротивления грунта при его промерзании также должно приводить к снижению амплитуды тока молний.

На заседании рассматривались вопросы, связанные с анализом грозопоражаемости кабелей связи. Были обсуждены методика и результаты расчета переходных процессов в кабелях, находящихся в однородных и неоднородных грунтах. Показано, что поражение кабеля в результате удара молнии не завершается его разрушением в точке контакта с каналом молнии или близкой к ней точке, поскольку при этом выделяется лишь некоторая доля энергии волны тока молний. Распространяющаяся вдоль каналов кабеля волна перенапряжений несет энергию, достаточную для его повторных разрушений. Специальные расчеты позволили выявить основные закономерности в токораспределении в зависимости от свойств среды и геометрии системы. Даются рекомендации по размещению кабелей и защитных тросов в однородном и неоднородном грунтах.

Расширенное заседание IV секции Научного Совета АН СССР приняло следующие решения:

отметить актуальность работ, связанных с разработкой руководящих технических материалов по созданию эффективных заземляющих устройств для электроустановок напряжением выше 1000 В, в том числе для Севера, а также технических нормативов на заземляющие устройства с учетом условий эксплуатации и сооружения электроустановок, принимая во внимание ГОСТ 12.1 : 038—82 на предельно допустимые токи и напряжения;

рекомендовать проведение исследований по оценке допустимых значений напряжения на теле человека и тока с учетом специфики Крайнего Севера;

считать необходимым продолжить разработку инженерной методики расчета и измерительной аппаратуры для оценки электробезопасности в электроустановках с различными режимами работы заземляющих устройств с учетом возможности выноса потенциала;

продолжить исследования условий электробезопасности с учетом взрыво- и пожаробезопасности производства, особенно для горнодобывающих предприятий и газопромыслов, безопасных схем электроснабжения передвижных электроустановок;

продолжить работы по уточнению параметров молний в условиях Крайнего Севера, оптимизации схем грозозащиты линий, подстанций и электрических машин, работающих в условиях многолетнемерзлых грунтов;

просить Главное управление электрификации МПС рассмотреть целесообразность использования рельсов главных, станционных и подъездных путей в качестве элементов системы заземления и грозозащиты;

просить Главтехуправление Минэнерго СССР рассмотреть возможность внедрения в высоковольтных сетях Крайнего Севера бестросовых схем грозозащиты подстанций, разработанных в ЛПИ им. М. И. Калинина;

обратить внимание Минэлектротехпрома на необходимость ускорения разработки и серийного выпуска нелинейных ограничителей перенапряжений для сетей с изолированной нейтралью;

обратить внимание Главтехуправления Минэнерго СССР на целесообразность более тщательного учета особенностей районов с экстремальными условиями при разработке новой редакции ПУЭ и Руководящих указаний по защите от перенапряжений. Просить ускорить выпуск «Временных методических указаний по нормам проектирования, способам выполнения и правилам эксплуатационного контроля заземляющих устройств в условиях многолетнемерзлых грунтов».

АЛЬТШУЛЕР Э. Б., БОГАТЕНКОВ И. М.,  
ХАЛИЛОВ Ф. Х.



УДК 621.314.632:061.3

## Второе научно-техническое совещание «Проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей»

(26—28 октября 1982 г., Таллин)

В работе совещания, созванного Научным Советом АН СССР по комплексной проблеме «Научные основы электрофизики и электротехники» и Институтом термофизики и электрофизики АН ЭССР, принимали участие более 150 специалистов из 60 научно-исследовательских и проектных организаций, предприятий и вузов страны.

Целью совещания было обсуждение научно-технических проблем генерирования и распространения помех в системах со статическими преобразователями, создания преобразователей с минимальными искажениями и помехоустойчивых систем управления преобразователями, определения направлений по оценке показателей электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей с сетями и нагрузками и их нормированных значений, теории и практики применения силовых фильтров, обмена информацией о достигнутых результатах и определения наиболее актуальных направлений дальнейших исследований. На совещании было заслушано и обсуждено 136 докладов и сообщений.

В ряде представленных докладов рассматривались общие вопросы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей (ЭСП).

Во вступительном докладе П. И. Тамкиви (ИТЭФ АН ЭССР) были затронуты некоторые вопросы истории развития проблем ЭСП и их современные технические, экономические и биологи-

ческие аспекты. В докладе А. К. Шидловского и И. В. Мостовяка (ИЭД АН УССР) рассматривался оригинальный энергетический подход к проблеме электромагнитной совместимости цепей источника и приемника на основе понятий неуравновешенной, идеальной и уравновешенной цепи. В докладах И. В. Жежеленко и О. Б. Шиманского (Ждановский металлургический институт) обсуждались режимно-технологические способы улучшения ЭСП. Было показано, что вероятность отказа помехочувствительных элементов электрооборудования определяется в основном посадкой напряжения и фактором состава нагрузки, выраженного через ее временную устойчивость. Повышение последней дает существенный экономический эффект. Рассматривалось также влияние глубины регулирования силовых полупроводниковых преобразователей на ЭСП.

Р. Р. Мамошин и В. Н. Никифорова (МИИТ, ВНИИЭ) рассмотрели принципы построения системы взаимоувязанных нормативов на помехоизлучение, помехоэкранимивость электрооборудования и электромагнитную обстановку в различных точках сети. Была показана целесообразность построить систему норм последовательно для каждого класса напряжения, начиная с сети низкого напряжения.

Ю. М. Быков (Москва) доложил о трудностях и недостатках применения спектрального метода при анализе проблем ЭСП и целесообразности использования для этого стохастических

методов и математического аппарата теории случайных процессов как более адекватных реальным системам, работающим в условиях непрерывных возмущений.

Часть докладов была посвящена различным аспектам ЭСП с питающей сетью. Г. В. Карапес, В. Г. Филатов, М. Ю. Бородулин (НИИПТ) и В. Н. Зажирко, А. Ю. Тэтэр (Омский ПИ), (Омский ИИЖТ) развили методы расчета и анализа возмущений и гармоник в сетях с полупроводниковыми преобразователями. В. А. Новский (ИЭД АН УССР) показал, что в трехфазных четырехпроводных неуравновешенных системах с нелинейными нагрузками перспективными являются многофункциональные трансформаторно-вертикальные устройства с минимальным сопротивлением нулевой последовательности основной и высших частот. В докладе О. Л. Владимира, Е. И. Ерохина, Т. И. Томсона (ИТЭФ АН ЭССР) рассматривались малоисследованные вопросы ЭСП с общими элементами для питания групповых нагрузок.

Подробный анализ отечественного и зарубежного опыта по созданию и применению тиристорных компенсаторов реактивной мощности и связанных с этим проблем ЭСП был дан в докладе Я. Ю. Солодухо (ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект»). Были показаны преимущества косвенного метода компенсации с фазоуправляемыми тиристорными ключами и реакторами. Анализ составляющих полной мощности сети при фазовом регулировании переменного напряжения был приведен в докладе Г. А. Шадрина (Томск). Новый метод уменьшения искажений формы напряжения инверторов с высокочастотным звеном был описан в докладе А. С. Морозова и В. А. Алексеева (Рязанский радиотехнический институт).

Эксплуатационные данные мощных тиристорных преобразователей с улучшенными энергетическими показателями по новой схеме и обусловленные ими искажения освещались в докладах С. П. Лохова, М. В. Гельмана, Ю. С. Григорьева, В. К. Добычина, С. Н. Савицкого и Н. П. Растворгueva (Челябинск). Новые подходы к расчету фильтрокомпенсирующих устройств показали в своих докладах С. Р. Глинтерник (Ленинград), Л. А. Добручин, Ю. П. Жирков (ВЭИ) и А. И. Дорошенко, В. А. Николенко (Одесский ПИ).

Достижение ЭСП в автономных системах соизмеримой мощности требует системного подхода к задачам ее структурной и параметрической оптимизации. Об этом сообщили в своих докладах Г. В. Грабовецкий, Е. А. Подъяков, С. А. Харитонов, В. В. Иванцов (НЭТИ), Б. Н. Калугин, В. Г. Андреев, И. В. Неждинов, И. И. Алексеев, М. М. Юхнин (Москва). Была показана возможность реализации системы с высокой степенью ЭСП на элементной базе разного уровня.

Оригинальные способы улучшения ЭСП в автономных системах путем усовершенствования способов управления отдельными функциональными звенями системы были изложены в докладах Ю. П. Гончарова, А. В. Ересяко, С. Н. Иванова, П. В. Натарова, Н. И. Лазарева (Харьковский ПИ), К. Г. Агапова, В. Л. Андриянова, В. А. Кулинича (Тернопольский филиал Львовского ПИ) и Д. В. Вилесова, В. Е. Гальперина (Ленинградский кораблестроительный институт, Севмашвтуз).

Вопросы влияния силовых полупроводников преобразователей на цепи передачи информации также нашли отражение на совещании.

Влияние выпрямительной нагрузки на работу реальной защиты и автоматики и возможности его уменьшения были рассмотрены в докладах А. Н. Висячева (Иркутский ПИ). Конкретные данные об уровне радиопомех вблизи мощных высоковольтных преобразовательных устройств приводились в докладе Б. Я. Богомольного, Ю. А. Гущина, П. З. Рокинсона. Расчету и способам уменьшения помех от магнитных полей внутри мощных преобразовательных агрегатов посвятили доклад М. Е. Гольдштейн и Р. В. Гайсаров (Челябинский ПИ).

Много докладов и сообщений было посвящено проблемам создания и исследования малоискажающих силовых полупроводниковых преобразователей. При этом можно различить два основных направления: поиск новых схемных решений силовой части преобразователей и усовершенствование систем управления известных типов преобразователей. Принципиально новые оригинальные схемы с малоискаженным первичным и вторичным токами для регулирования переменного и выпрямленного напряжений с использованием управляемого междуфазного энергобмена были описаны и исследованы в докладах В. В. Сарва, Т. Ю. Саккоса, М. Р. Оявэрса (ИТЭФ АН ЭССР). Новые возможности построения преобразователей переменного напряжения без искажений на основе трансформаторно-ключевых структур с двумя электромагнитными элементами рассматривали в своем докладе К. А. Липковский и Ю. В. Сидоренко (ИЭД АН УССР). Способ регулирования и стабилизации трехфазного

напряжения с малыми искажениями с помощью автотрансформаторного преобразователя числа фаз и блока тиристоров и возможности построения на этой основе регулируемых выпрямителей с малым коэффициентом пульсаций, не зависящим от глубины регулирования, были описаны в докладе Л. Э. Рогинской, Г. С. Анисимовой, Г. Г. Леликова, Ю. А. Лось, Р. А. Ахмерова, А. Г. Жуковой и В. Г. Терентьева (Уфимский АИ).

Возможности улучшения ЭСП путем усовершенствования систем управления инверторами рассмотрели в своем докладе В. Е. Тонкаль, Э. Н. Гречко, Д. С. Вертелецкий (ИЭД АН УССР). Переход от простой амплитудно-импульсной модуляции к ее модификациям с увеличенным числом формируемых прямоугольных импульсов приводит к ослаблению целого ряда близлежащих к основной гармоник. Проблемы построения пресциональных регулируемых источников постоянного тока с высокими требованиями по качеству фильтрации выходного тока рассматривали в своих докладах В. М. Рябенький, С. М. Исааков, И. И. Гусев (Николаевский кораблестроительный институт) и В. П. Шипилло, Я. В. Щербак (Харьковский ПИ). Для этой цели используются сложные многоконтурные системы обратных связей, активные и пассивные фильтры и адаптивные системы подавления неканонических гармоник.

В ряде докладов рассматривались различные способы повышения помехоустойчивости систем управления полупроводниковых преобразователей. Одной из тенденций в этом направлении можно считать введение и усовершенствование логических процедур обработки информации в цепях управления. Этим вопросам были посвящены доклады Л. А. Рутманиса, В. Ю. Лукшича (ФЭИ АН Латв. ССР), А. И. Тарасенко (Киевский ПИ) и др. Помехоустойчивая оптронная связь в цепях управления рассматривалась в докладе Ф. Ш. Абсалямова, Р. А. Закирова и В. Э. Дель (Уфимский АИ).

Новым быстро развивающимся направлением в решении проблем ЭСП является применение методов и средств электронно-вычислительной техники. Эти вопросы затронули А. А. Рупейка, В.-А. А. Палшитас, В. В. Битаутас, А.-А. А. Бельских, Х. А. Будреке (Клайпедский факультет Каунасского ПИ). Новые разработки в области цифровых систем управления преобразователями частоты, широтно-импульсными модуляторами и выпрямителями описывали в своих докладах В. П. Мордач, Б. Е. Пьяных, Э. М. Чехет (ИЭД АН УССР), А. В. Шарапов (Томск), В. П. Погорелов, В. А. Чекалов (Москва, Комсомольск-на-Амуре), Л. П. Деткин (ВНИИЭМ) и др.

Одними из основных средств обеспечения ЭСП по-прежнему являются силовые фильтры. Эти вопросы рассматривались в докладах Е. И. Гольдштейна, А. А. Чернышева (Томск) и др.

Оригинальный подход к расчету входных и выходных фильтров импульсных преобразователей постоянного тока с показом дуальности протекающих в них процессов продемонстрировали в своем докладе Г. В. Ивенский и А. С. Соколов (Северо-западный ПИ).

Возрастающее внимание уделяется развитию мощных активных фильтров переменного и постоянного тока, в частности на ключевых элементах.

Оригинальные принципы построения силовых активных фильтров напряжения обратной последовательности поперечного включения описывались в докладе А. К. Шидловского и В. С. Федий (ИЭД АН УССР). Новые схемы индуктивно-ключевых фильтров и методов их расчета рассматривали М. Р. Оявэр, Ю. Э. Сооярв, П. К. Терасма (ИТЭФ АН ЭССР), С. Ф. Сергеев, А. П. Чубатый (Тернопольский филиал Львовского ПИ). Мощный фильтр для сглаживания постоянного тока до 4 кА на базе транзисторного ШИМ был описан в докладе, который сделали П. И. Тамкиви, А. М. Туйск (ИТЭФ АН ЭССР). Возможности повышения мощности транзисторных фильтров путем параллельного включения к транзистору индуктивностей показал Ю. Э. Сооярв (ИТЭФ АН ЭССР).

В докладах В. В. Ермуратского (Отдел энергетической кибернетики АН МССР), Г. Г. Трофимова, В. В. Сысоева, И. М. Винера, В. Я. Экштута (Алма-Ата, Усть-Каменогорск) В. Ф. Худякова (ЛИАП) и др. рассматривались особенности работы конденсаторных батарей в силовых фильтрах.

В принятых на основе обсуждений и дискуссий рекомендациях совещания отмечалось, что в период после первого совещания по этой тематике возросла актуальность проблемы электромагнитной совместимости силовых полупроводниковых преобразователей с окружающей электромагнитной средой, а также расширился фронт работ по этой тематике.

ТАМКИВИ П. И.

# Академик Б. М. Вул

(К 80-летию со дня рождения)

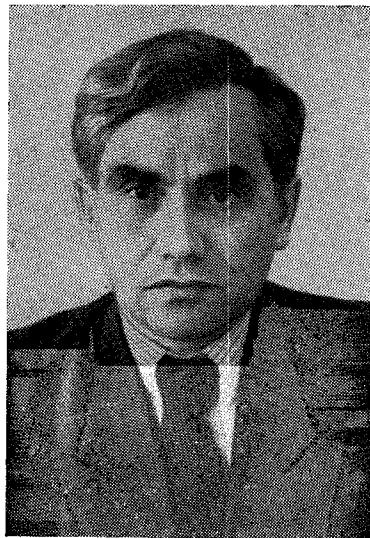
Бенцион Моисеевич Вул родился 22 мая 1903 г. в г. Белая Церковь. Участник гражданской войны, член КПСС с 1922 г., он был направлен по путевке комсомола в Киевский политехнический институт, электротехнический факультет которого окончил в 1928 г., и был оставлен в аспирантуре; с 1929 г. перешел в аспирантуру АН СССР. В 1930—1932 гг. он работал под руководством академика А. Ф. Иоффе в лаборатории физики диэлектриков Ленинградского физико-технического института. К этому времени относится их совместная научная работа по изучению поверхностного пробоя диэлектриков: впервые предложено техническое использование обладающего высокой диэлектрической проницаемостью рутила  $TiO_2$ . При изучении пробоя твердых диэлектриков Б. М. Вулом было открыто и исследовано явление последовательного пробоя, также имеющего существенное значение для физики диэлектриков и техники высоких напряжений.

Окончив аспирантуру в 1933 г., Бенцион Моисеевич по предложению академика С. И. Вавилова организовал и возглавил лабораторию диэлектриков в Физическом институте Академии наук СССР (ФИАН). Здесь им, в частности, была подробно исследована электрическая прочность скатых (до 10 МПа) газов, а также воздуха при пониженных давлениях. Продолжая подробное изучение вопросов физики диэлектриков, Б. М. Вул в 1935 г. защитил диссертацию по этим вопросам и получил учennую степень доктора физико-математических наук.

В годы Великой Отечественной войны Б. М. Вул руководил исследованиями по разработке керамических конденсаторов для войсковых радиостанций. В качестве диэлектрика в этих конденсаторах были исследованы соединения  $TiO_2$  с оксидами различных металлов. Дальнейшие исследования этих систем оксидов привели 1944 г. к фундаментальному открытию — установлению сегнетоэлектрических свойств титаната бария  $BaO \cdot TiO_2$ . За эту работу Бенцион Моисеевич был удостоен Государственной премии СССР.

Открытие исключительных свойств титаната бария повлекло за собой открытие и внедрение в промышленность ряда технологически удобных, обладающих высокой механической прочностью, влагостойкостью и регулировкой в широком диапазоне температур точкой Кюри керамических сегнето- и пьезоэлектрических материалов.

В начале 50-х годов в руководимой Бенциона Мойсеевичем лаборатории ФИАН были развернуты в весьма широком масштабе исследования по физике полупроводников. Впервые в СССР



была проведена вакуумная плавка герmania и выращены его монокристаллы по методу Чохральского. Лаборатория Б. М. Вула совместно с ВЭИ занималась также исследованием мощных полупроводниковых выпрямителей.

По предложению академика И. В. Курчатова в лаборатории Б. М. Вула были проведены исследования диэлектриков под действием мощного ионизирующего облучения, что было необходимо для проектирования атомных реакторов. Был также разработан новый полупроводниковый материал — теллурид кадмия, перспективный для применения в детекторах и счетчиках радиоактивного излучения и в преобразователях лучистой энергии в электрическую.

Из работ Б. М. Вула последних лет существенное значение имеет изучение компенсированного арсенида галлия при высокой концентрации примесей. Много внимания уделялось работам по изучению экситонов.

Учитывая исключительно большое значение, которое приобретает изучение и практическое применение явления сверхпроводимости, Бенцион Моисеевич включил в тематику руководимой им лаборатории работы как по изучению физических основ этого явления, так и по технической разработке сверхпроводящих устройств.

Велика роль Бенциона Моисеевича в воспитании высококвалифицированных инженерных и научных кадров. В различные годы он вел преподавательскую работу в Киевском и Ленинградском политехнических институтах, в Военно-воздушной академии им. Н. Е. Жуковского. Многие десятки его учеников, в том числе аспирантов и сотрудников ФИАН, стали докторами и

кандидатами наук, руководителями научных учреждений и кафедр вузов.

Б. М. Вул опубликовал более 200 фундаментальных научных трудов. Многие годы он активно сотрудничает в старейшем отечественном научном журнале «Электричество». Велика его роль и как выдающегося популяризатора научных знаний. Будучи членом редакционных коллегий БСЭ и Физического энциклопедического словаря, он во многом способствовал высокому научному уровню этих изданий и лично составил для них ряд статей по ключевым вопросам физики и электротехники. Большое участие принимал Бенцион Моисеевич в разработке фундаментальных философских вопросов физики.

Бенцион Моисеевич Вул на протяжении многих лет был председателем Всеобщего бюро электрической изоляции (ныне Секция электрической изоляции НТОЭ и ЭП), председателем Комиссии по диэлектрикам АН СССР, в настоящее время является председателем Научного совета АН СССР по комплексной проблеме «Физика и химия полупроводников». В 1939 г. он был избран членом-корреспондентом, а в 1972 г. — действительным членом Академии наук СССР. В течение ряда лет был заместителем директора ФИАН и заместителем академика-секретаря Отделения физико-математических наук АН СССР. Бенцион Моисеевич является организатором и руководителем целого ряда научных конференций в нашей стране, а также виднейшим деятелем научной общественности в международных организациях. Он — многократный участник Пагуашских конференций; многие годы был членом Совета Европейского физического общества, вице-президентом Международного союза чистой и прикладной физики. В 1982 г. Б. М. Вул награжден Президиумом Чехословацкой Академии наук золотой медалью «За заслуги перед наукой и человечеством».

Деятельность Бенциона Моисеевича Вула высоко оценена Родиной. Он награжден пятью орденами Ленина, орденами Октябрьской Революции, Трудового Красного Знамени, Красной Звезды и «Знак Почета», а также многими медалями. Помимо упомянутой выше Государственной премии СССР (1946 г.), ему присуждена в 1964 г. Ленинская премия за фундаментальные исследования по созданию полупроводниковых квантовых генераторов, а в 1969 г. присвоено высокое звание Героя Социалистического Труда.

Редакция и редколлегия журнала «Электричество», группа товарищей и учеников

# СОДЕРЖАНИЕ

Арзамасцев Д. А., Игуменщев В. А., Саламатов И. А., Коваленко Ю. П. — Расчет нестационарного режима в системе электроснабжения с резкопеременными нагруз- ками . . . . .	
Шидловский А. К., Кузнецов В. Г. — Пофазная коррекция токов в сети с нулевым проводом при случайном характере их изменения . . . . .	1
Урусов И. Д. — Моделирование колебательных про- цессов в валопроводе турбоагрегата . . . . .	5
Костянец В. С. — Исследование асинхронных ре- жимов мощных гидрогенераторов . . . . .	8
Инкин А. И. — Расчет вихревого и потенциального магнитных полей в явнополюсных электрических ма- шинах . . . . .	11
Жемеров Г. Г., Коваленко И. Т. — Внешние ха- рактеристики выпрямителя с поочередным регулиро- ванием . . . . .	15
Вадачкория Г. В. — Анализ стабилизирующих свойств параметрических источников тока . . . . .	19
Мелешкин В. Н. — Матричное преобразование урав- нений состояния и эквивалентные схемы линейных цепей	25
Козырев С. К. — Исследование переходных процес- сов в электроприводе постоянного тока при изменении магнитного потока двигателя . . . . .	29

## ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

Мозырский В. И. — Распространение токов при одно- фазном коротком замыкании в распределительстве высокого напряжения . . . . .	38
Курганов С. А., Филаретов В. В. — Метод многова- риантного анализа нелинейных электронных схем . . . . .	42
Локарев В. И. — Исследование резонансно-парамет- рического измерительного преобразователя сдвига фаз	44
Юдин В. В. — Об эквивалентном преобразовании сложной магнитной цепи с контурами электрической связи	46
<b>СООБЩЕНИЯ</b>	
Богданов В. А. — Выбор параметров системы сбора телеинформации . . . . .	48
Красников В. И., Сагутдинов Р. Ш. — Расчет сим- метричных составляющих напряжения при разрыве одной фазы в сети 0,38 кВ . . . . .	49
Соболев В. Г. — Механизм поверхностной проводимости твердых диэлектриков . . . . .	51
Князь А. И., Драганов В. М. — О расчете электроста- тических полей в кусочно-однородных средах . . . . .	55
<b>ДИСКУССИИ</b>	58
<b>БИБЛИОГРАФИЯ</b>	73
<b>ХРОНИКА</b>	75

## CONTENTS

Calculating Non-Stationary Conditions in a Power Supply System Having Extremely Variable Loads — D. A. Arzamast- sev, V. A. Igumenschev, I. A. Salamatov, U. P. Kovalenko	
Phase-Phase Correction of Stochastically Varying Cur- rents in a Circuit With a Neutral Conductor — A. K. Shidlov- ski, V. G. Kuznetsov . . . . .	1
Simulation of Oscillations in the Shaft Line of a Turbine Unit With Account Taken of the Power System — I. D. Urusov	5
A Study of Out-of-Step Conditions of Large Hydro-Elec- tric Generators — V. S. Kostelyanets . . . . .	8
Calculating Circuital and Potential Magnetic Fields in Sa- lient-Pole Electric Machines — A. I. Inkin . . . . .	11
External Characteristics of a Rectifier With Sequence Control — G. G. Djemerov, I. T. Kovalenko . . . . .	15
Analysis of the Stabilizing Properties of Parametrical Current Sources — G. V. Vodachkoria . . . . .	19
Matrix Transformation of the State Equations and Equi- valent Networks for Linear Circuits — V. N. Meleshkin . . . . .	25
A Study of Transients in a D. C. Drive for Variations in the Magnetic Flux of the Motor — S. K. Koziryev . . . . .	29

## FROM OPERATING EXPERIENCE

Current Distribution for a Single-Phase Fault on High- Voltage Switchgear — V. I. Mozirski . . . . .	38
A Multi-Option Method of Analysis of Non-Linear Electro- nic Circuits — S. A. Kurganov, V. V. Filaretov . . . . .	42
A Study of a Parametrical-Resonant Phase Shift Trans- ducer — V. I. Lokarev . . . . .	44
On the Transformation of a Complex Magnetic Circuit With Electric Coupling Circuits — V. V. Yudin . . . . .	46
<b>REPORTS</b>	
Selecting the Parameters for a System Collecting Tele- information — V. A. Bogdanov . . . . .	48
Calculating the Symmetrical Components of the Voltage for an Open Phase-Conductor in a 0.38 kV Network — V. I. Krasnikov, R. S. Sagutdinov . . . . .	49
Mechanism of Surface Admittance in Solid Dielectrics— V. G. Sobolev . . . . .	5
On Calculating Electrostatic Fields in Piece-Wise Homo- genious Media — A. I. Knyaz, V. M. Draganov . . . . .	5
<b>DISCUSSION</b>	5
<b>BIBLIOGRAPHY</b>	7
<b>CHRONICLE</b>	7

# Рефераты публикуемых статей

УДК 621.316.1.018.782.3.001.24

Расчет нестационарного режима в системе электроснабжения с резервированием нагрузками. Арзамасцев Д. А., Игуменщев В. А., Саламатов И. А., Коваленко Ю. П. — «Электричество», 1983, № 5.

Предложен алгоритм расчета режимов системы электроснабжения промышленного предприятия, построенный на методе последовательного эквивалентирования в сочетании с методом последовательных интервалов. Собственность алгоритма — эквивалентирование и развертывание электрической схемы на каждом временном интервале. Библ. 5.

УДК 621.316.1.014.001.21

Пофазная коррекция токов в сети с нулевым проводом при случайном характере их изменения. Шидловский А. К., Кузнецов В. Г. — «Электричество», 1983, № 5.

Предложен и теоретически обоснован способ пофазной коррекции якорей в трехфазной линии низкого напряжения. Приведен алгоритм оптимального переключения нагрузок между фазами сети при случайном характере изменения их параметров. Библ. 6.

УДК 621.313.322-81.018.2.3.001.57

Моделирование кабельных процессов в валопроводе турбогенератора. Русланов И. Д. — «Электричество», 1983, № 5.

Изложена методика моделирования гамма-колебательных процессов валопроводов современных мощных турбогенераторов, учитывающая сложный обмен энергией между энергосистемой, инерционными, упругомеханическими и электромагнитными элементами агрегата. Библ. 9.

УДК 621.313.322-82.018.782.3:621.316.925

Исследование асинхронных режимов мощных гидрогенераторов. Константинов В. С. — «Электричество», 1983, № 5.

Определена допустимая длительность асинхронных режимов мощного гидрогенератора по условиям термической стойкости его обмоток. Показано, что гидрогенератор необходимо отключать, как правило, на первом обороте ротора. Рекомендована защита от асинхронных режимов, основанная на фиксации времени изменения внутреннего угла синхронной машины от  $\pi$  до  $3\pi/2$ . Библ. 7.

УДК 621.313.013.001.24

Расчет вихревого и потенциального магнитных полей в явнополюсных электрических машинах. Иникин А. И. — «Электричество», 1983, № 5.

На базе кусочных собственных функций приводится аналитическое решение задачи о расчете магнитного поля в активном объеме явнополюсной электрической машины, включающей в себя ферромагнитные (сечной магнитной проницаемостью) полюса, между полюсные пространства, занятые током, и воздушный зазор.

Показано, что в ряде случаев решение задачи можно реализовать без применения вычислительной техники. Библ. 2.

УДК 621.314.632.012.6.001.24

Внешние характеристики выпрямителя с поочередным регулированием. Жемеров Г. Г., Коваленко И. Т. — «Электричество», 1983, № 5.

Расчет внешних характеристик выпрямителя с поочередным регулированием связан с необходимостью учета сложного характера изменения полей управления вентильных групп и взаимовлияния вентильных групп через общую для них индуктивность питающей сети. Выведены аналитические соотношения, позволяющие при различных законах управления определить среднее значение выходного напряжения и значения углов коммутации в мостах с учетом параметра, характеризующего степень взаимо действия через питающую сеть. Приведены семейства внешних характеристик для различных значений параметра реактанса секций и двух зон управления. Библ. 3.

УДК 621.372.061

Анализ стабилизирующих свойств параметрических источников тока. Вадачкория Г. В. — «Электричество», 1983, № 5.

Рассмотрены вопросы стабилизации выходного тока в преобразователях источников напряжения в источники тока. Получены обобщенные расчетные соотношения для преобразователей любой структуры, позволяющие производить рациональный выбор той или иной схемы при разработке источников тока с заданными стабилизирующими свойствами. Дан статистический анализ трехлучевых схем индуктивно-емкостных преобразователей по степени стабилизации выходного тока. Библ. 9.

УДК 621.372.001.24:519.17

Метод многовариантного анализа нелинейных электронных схем. — Курганов С. А., Филаретов Б. В. — «Электричество», 1983, № 5.

УДК 621.372.001.24

Матричное преобразование уравнений состояния и эквивалентные схемы линейных цепей. Мелешкин В. Н. — «Электричество», 1983, № 5.

С единых позиций матричного преобразования уравнений состояния цепи исследованы возможности ее представления в виде двух- и много-полюсников, а также трансформации последних в результате изменения количества внешних узлов, их приоритета или ориентации токов и направлений и т. п. Для всех рассмотренных способов структурных преобразований в электрических цепях обоснованы правила формирования соответствующих им матриц связи. Показано, что матричное преобразование уравнений состояния в любом из перечисленных выше случаев представляет собой последовательность элементарных операций типа умножение, транспонирование и обращение матриц, которые удобно выполнять на ЭВМ. Библ. 10.

УДК 62-83:621.3.018.782.3.001.24

Исследование переходных процессов в электроприводе постоянного тока при изменении магнитного потока двигателя. Коэзрев С. К. — «Электричество», 1983, № 5.

Рассмотрены оптимальные переходные процессы при изменении потока двигателя электропривода с двухзонным регулированием скорости и зависимым управлением полем, обеспечивающие отработку заданного изменения скорости или перемещения за заданное время при наименьших электрических потерях в якорной цепи. Найдены аналитические зависимости тока, скорости, перемещения и электрических потерь от времени. Проанализирована эффективность применения оптимальных переходных процессов в сравнении с равноскоренными. Библ. 3.

УДК 621.316.37.027.8.064.1.001.24

Распределение токов при однофазном коротком замыкании в распределительстве высокого напряжения. Мозырский В. И. — «Электричество», 1983, № 5.

Приведена методика расчета распределения тока при однофазном коротком замыкании между заземлителем распределительства высокого напряжения и системами «трос — опоры» при наличии на подводе к распределительному устройству грозозащитных тросов, выполненных из цветного металла. Библ. 4.

УДК 621.316.372.001.24:519.17

Метод многовариантного анализа нелинейных электронных схем. — Курганов С. А., Филаретов Б. В. — «Электричество», 1983, № 5.

Предложен метод анализа статического и динамического режимов цепей, заключающийся в составлении буквенно-числовой математической модели в виде системы нелинейных уравнений относительно передаточных функций на базе статических проводимостей резистивных элементов и связей, итерационного представления реактивных компонентов, схем замещения части независимых источников эквивалентными отрицательными проводимостями. Модель схемы обладает неизменной структурой в процессе параметрической оптимизации. Библ. 4.

УДК 621.317.77

Исследование резонансно-параметрического измерительного преобразователя сдвига фаз. Локарев В. И. — «Электричество», 1983, № 5.

Рассмотрены возможные варианты схем многофункционального резонансно-параметрического преобразователя в режиме измерения сдвига фаз электрических колебаний. Приведены результаты исследования влияния на выходной сигнал и чувствительность преобразователя параметров колебательного контура. Библ. 4.

УДК 621.316.1.015.001.24

Расчет симметричных составляющих напряжений при разрыве одной фазы в сети 0,38 кВ. Красников В. И., Сагутдинов Р. Ш. — «Электричество», 1983, № 5.

Приведена методика определения сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей элементов сети 0,38 кВ для расчета неполнофазных режимов. Рассмотрены результаты расчета неполнофазного режима с учетом изменения сопротивлений нагрузки. Библ. 4.

## 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., Лизунов С. Д., Мамиконянц Л. Г. (главный редактор), Меерович Э. А., Мучник Г. Ф., Нетущий А. В., Сабинин Ю. А., Слежановский О. В., Соловьев С. А., Тареев Б. М., Тихоедов Н. Н., Толстов Ю. Г., Федосеев А. М., Шакарян Ю. Г., Шаталов А. С., Шилин И. В.

Научные редакторы: А. Б. Желдыбин, Б. Д. Макаршин

Адреса редакции: 103012, Москва, К-12, Б. Черкасский пер., 2/10. Телефон 294-24-80

101000, Москва, Главный почтамт, абонентский ящик № 648

Адрес для телеграмм: Москва, 12, Электричество  
Технический редактор О. Д. Кузнецова

дано в набор 16.03.83. Подписано в печать 16.05.83. Т-08391  
запечатано в высокую Усл. печ. л. 10,0 Усл. кр.-отт. 10,5 Уч.-изд. л. 13,81

Формат 60×90 $\frac{1}{4}$   
Тираж 5824 экз.

Гарнитура литературная  
Заказ 711

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