ISSN 0013-5380

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1979

·ЭНЕРГИЯ·

3

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

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

ЖУРНАЛ
ОСНОВАН
в 1880 г.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

3
1979
МАРТ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, ГОСУДАРСТВЕННОГО КОМИТЕТА
СССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ, ЦП НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА ЭНЕРГЕТИКИ
И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 621.311.018.41.016.2.78

Экспериментальная цифровая система автоматического регулирования частоты и активной мощности ЕЭС СССР

СОВАЛОВ С. А., БЕРКОВИЧ М. А., КОМАРОВ А. Н., ВОВЧЕНКО И. И.,
СЕГУРА Х., ПОПОВ Ю. И., АРБУЗОВ А. Ф., АНИСИМОВА Е. И.

Москва

Рост объединенных энергосистем (ОЭС) и формирование Единой энергетической системы (ЕЭС) СССР выдвинули на первый план задачу автоматизации управления режимами по частоте и активной мощности. Решение комплексной задачи автоматизации регулирования частоты и активной мощности обеспечивает улучшение качества электроэнергии и повышение экономичности работы ЕЭС и ОЭС за счет стабилизации частоты, улучшения использования пропускной способности регулируемых связей и поддержания обменной мощности на заданном (оптимальном) уровне. Особенно важное значение имеет повышение надежности, достигаемое стабилизацией частоты и поддержанием перетоков мощности по основным электрическим связям в пределах, допустимых по условиям устойчивости параллельной работы.

На современном этапе развития системы автоматического регулирования частоты и активной мощности (АРЧМ) все больше приобретают характер основной системной автоматики управления нормальными режимами ОЭС и ЕЭС СССР.

Поскольку управление режимами ОЭС и ЕЭС требует координации функций и действия множества звеньев, системы АРЧМ в ОЭС и ЕЭС развивались как централизованные комплексы контроля и управления, базирующиеся на развитых системах сбора и передачи телеинформации. В 1966—1968 гг. первые централизованные системы АРЧМ, основанные на принципе раздельного регулирования плановых и внеплановых нагрузок [Л. 1] появились в ОЭС Урала и Сибири. В настоящее время такие системы АРЧМ созданы в ОЭС Северо-Запада, Закавказья, Средней Азии, Юга и Северного Казахстана. Разрабатывается централизованная система АРЧМ Востока. Все системы сначала были выполнены на аналоговой электромеханической аппаратуре (в основном разработанной и изготовленной институтом Энергосетьпроект) и за время эксплуатации показали высокую надежность и эффективность.

С дальнейшим развитием ЕЭС СССР и усложнением ее схемы резко повышается роль и расширяются функции систем автоматического управления режимами по частоте и активной мощности. Определяющими становятся функции координации работы централизованных систем АРЧМ ЕЭС и ОЭС с учетом иерархии оперативно-диспетчерского управления, жесткой взаимосвязанности режимов различных частей ЕЭС, усложнения режимов и возрастающих в связи с этим требований по обеспечению устойчивости параллельной работы и взаимодействию систем АРЧМ с системами противоаварийного управления. Указанное делает необходимым создание систем АРЧМ, обладающих свойствами адаптивности и способных осуществлять оптимальное управление в непрерывно изменяющихся условиях работы сложного энергообъединения. Такие системы, как показывает практика в других областях, могут быть созданы на основе применения малых ЦВМ в качестве центральных устройств управления.

Переход от аналоговых центральных устройств АРЧМ к цифровым позволяет:

построить систему АРЧМ, способную автоматически приспосабливаться к новым условиям при изменении схемы основных электрических связей и состава регулирующих электростанций;

реализовать сложные логические взаимосвязи в процессе анализа текущего режима, выявления факта нарушения режима и определения оптимальных управляющих воздействий;

© Издательство «Энергия», «Электричество», 1979 г.

ВОЛОГОДСКАЯ
областная библиотека
им. И. В. Бабушкина

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

обеспечить рациональное совместное использование гидравлических и тепловых электростанций в общем процессе регулирования режима;

повысить работоспособность управляющего комплекса в целом и предотвратить неправильные его действия при неисправностях отдельных элементов комплекса (в особенности аппаратуры и каналов передачи информации);

улучшить помехоустойчивость системы путем достоверизации используемой информации;

обеспечить диспетчера информацией в объеме, достаточном для оценки текущего режима и контроля за его изменением при действии системы АРЧМ.

Использование ЦВМ в контуре прямого автоматического управления режимом имеет ряд особенностей в сравнении с использованием их в других временны́х уровнях автоматизированных систем диспетчерского управления:

повышенные требования к надежности функционирования вычислительного комплекса, поскольку его сбои приводят к отказу системы АРЧМ, что может стать причиной возникновения серьезного нарушения режима энергообъединений;

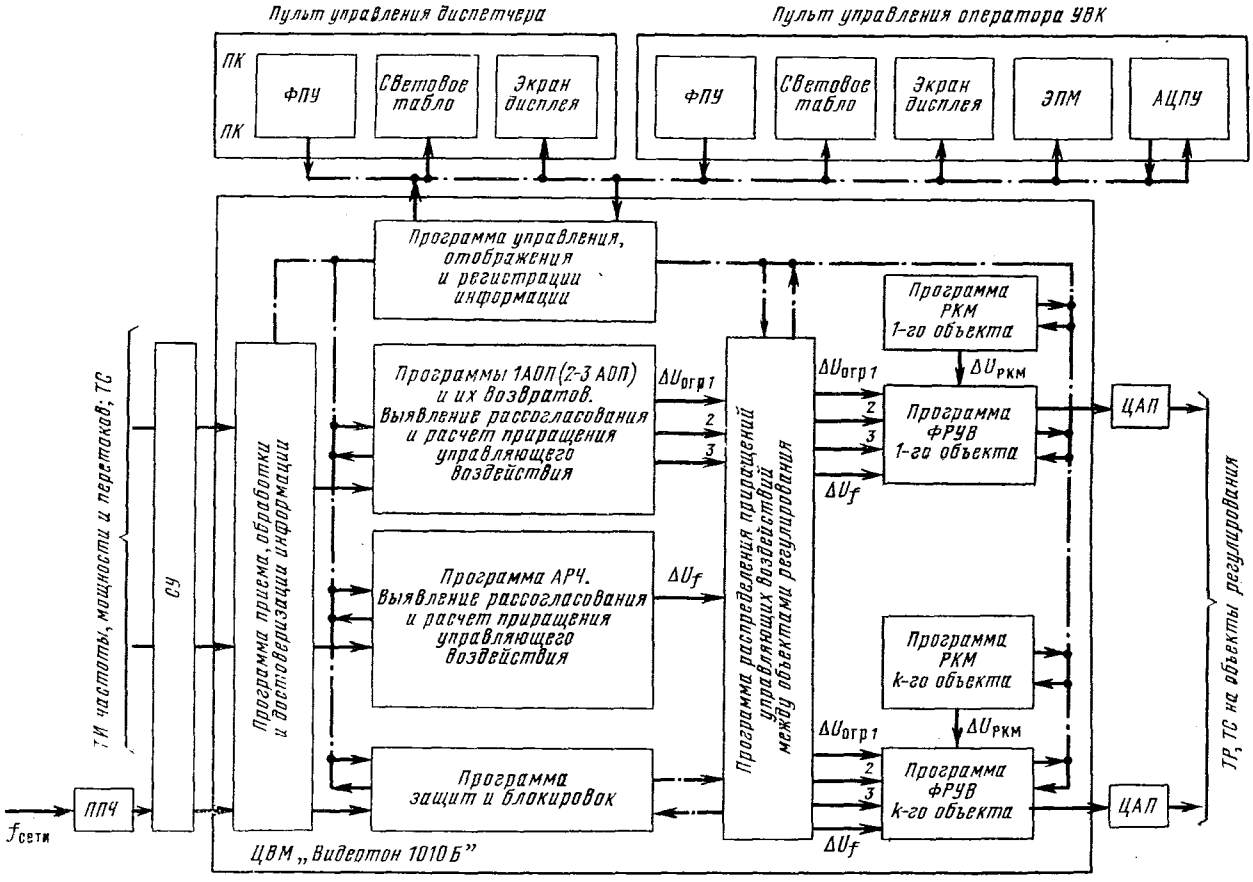
наличие сложных технологических алгоритмов, реализующих процесс автоматического управления без участия человека (вмешательство инженера ограничивается назначением режима регулирования и изменением уставок);

специфические требования к системе общения оперативно-диспетчерского персонала с ЦВМ, сводящиеся к обеспечению наиболее простого, быстрого и наглядного способа общения, возможность ошибок при котором была бы сведена к минимуму, даже в условиях предаварийной ситуации;

трудности с организацией достоверизации информации о режиме, которая должна осуществляться без существенного замедления процесса управления, поскольку от быстродействия системы АРЧМ зависит ее эффективность.

Экспериментальная цифровая централизованная система АРЧМ (ЦФАРЧМ) уровня ЕЭС СССР разработана и проверена в условиях эксплуатации. Эта система выполнена с использованием управляющей ЦВМ третьего поколения типа Видеотон-1010Б (см. рисунок).

Целью создания экспериментальной цифровой системы было решение основных вопросов, связанных с использованием цифровой техники для автоматизации режимов по частоте и активной мощности. На этом этапе для цифровой системы приняты технологические алгоритмы, ранее отработанные и показавшие свою эффективность на аналоговых системах АРЧМ. Вместе с тем подлежали проверке возможность расширения функций и дальнейшего совершенствования системы, основанной на применении ЦВМ.



Структурная схема цифровой системы АРЧМ в ЕЭС СССР.

ПК — прибор контроля; *СУ* — согласующее устройство; *УВК* — управляющий вычислительный комплекс; *ФПУ* — функциональный пульт управления; *ЦАП* — цифро-аналоговый преобразователь; *ТИ* — телеизмерение; *ТР* — телерегулирование; *ТС* — телесигнализация.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Ниже приведены основные характеристики экспериментальной цифровой системы АРЧМ ЕЭС СССР.

Цифровая система АРЧМ, как и аналоговые централизованные системы, строится по принципу раздельного регулирования плановых и внеплановых изменений активной мощности. Регулирование плановых изменений активной мощности осуществляется реализацией каждой электростанцией заданного суточного графика изменения ее генерируемой мощности. Плановые графики определяются в вычислительных центрах Центрального диспетчерского управления (ЦДУ) и энергосистем при разработке оптимальных режимов на следующие сутки и при необходимости корректируются диспетчерами по ходу оперативного управления. Регулирование внеплановых изменений мощности возлагается на систему автоматического регулирования, обеспечивающую поддержание частоты, заданных значений обменной мощности и ограничение перетоков мощности по перегружающимся связям.

ЦфАРЧМ ЕЭС СССР, регулируя внеплановые изменения активной мощности, воздействует на изменение мощности электростанций, подключенных к автоматической системе, по пропорционально-интегральному закону. Центральные устройства ЦфАРЧМ, расположенные на диспетчерском пункте (ДП) ЕЭС СССР, вырабатывают только интегральные составляющие управляющих воздействий. Пропорциональная составляющая этих воздействий получается непосредственно на регулирующих электростанциях путем дифференцирования интегральной составляющей.

В процессе разработки системы ЦфАРЧМ рассмотрены следующие вопросы:

контроль текущего режима и выявление необходимости его изменения;

формирование управляющих воздействий по режимам регулирования;

действие защит и блокировок в системе регулирования при нарушении режима основной сети ЕЭС СССР и при возникновении неисправности в звеньях, входящих в состав системы АРЧМ;

управление системой АРЧМ, отображение информации и регистрация режима АРЧМ.

Система ЦфАРЧМ позволяет осуществлять автоматическое ограничение перетоков мощности по ВЛ 500 кВ и астатическое регулирование частоты в ЕЭС. Кроме указанных режимов, предусмотрена возможность изменения мощности каждого объекта регулирования с ДП ЦДУ ЕЭС от ручного корректора мощности.

К участию в работе системы ЦфАРЧМ привлекаются Волжские и Саратовская ГЭС, а также Камская и Воткинская ГЭС через централизованную систему АРЧМ, действующую на ДП ОДУ Урала.

Управляющее воздействие (внеплановое задание) для каждого объекта регулирования формируется по интегральному закону суммированием всех сигналов приращения управляющих воздействий, приходящихся на объект за цикл расчета, по каждому виду регулирования. Участие объекта в регулировании определяется значением коэффициента долевого участия этого объекта в данном виде регулирования. Сигнал задания внеплановой нагрузки передается с ДП ЦДУ ЕЭС в систему регулирования объектов с помощью тех же средств передачи телеинформации, которые используются для централизованной аналоговой системы АРЧМ ЕЭС СССР. На управляющий вычислительный комплекс ЦфАРЧМ, размещаемый на ДП ЦДУ ЕЭС СССР, возложены функции центральных устройств системы регулирования, осуществляющих формирование управляющего воздействия по видам регулирования и управляющих сигналов при действии защит и блокировок, управление системой АРЧМ и отображение информации, а также регистрацию контролируемых параметров при нормальном режиме и при возникновении неисправности в ЦфАРЧМ и нарушениях нормального режима работы энергосистем.

Контроль текущего режима, выявление необходимости его изменения, формирование управляющих воздействий на объекты регулирования, а также управление при действии защит и блокировок производится в соответствии с разработанными технологическими алгоритмами. Условно принято следующее деление технологических алгоритмов по выполняемым ими функциям:

формирование сигнала приращения управляющего воздействия в режиме ограничения перетока мощности;

формирование сигнала приращения управляющего воздействия в режиме регулирования частоты;

распределение сигнала приращения управляющего воздействия между объектами регулирования;

управление от ручного корректора мощности;

формирование результирующих управляющих воздействий для каждого объекта регулирования с учетом блокировок и взаимодействия алгоритмов отдельных видов регулирования.

Режим ограничения перетока мощности (АОП). Режим ограничения перетока мощности по связям в системе ЦфАРЧМ осуществляется в основном без нарушения баланса генерируемой и потребляемой мощности путем одинакового по величине, но разного по знаку воздействия на группы электростанций, находящиеся по обе стороны от участков межсистемной связи, по которой производится ограничение перетока мощности.

По всем контролируемым линиям электропередачи режим ограничения перетока мощности осуществляется при положительном и отрицательном направлении перетока мощности. Ограничение перетока мощности по j-м связям осуществляется астатически по критерию:

$$\Delta P_{\text{огр}\,j}=0.$$

При этом отклонение перетока в режиме ограничения определяются следующим образом:

$$\Delta P_{\text{огр}j}=P_j-P_{\text{огр}\,j1} \text{ при } P_j\geqslant P_{\text{огр}\,j1};$$

$$\Delta P_{\text{огр}\,j}=P_j-P_{\text{огр}\,j2} \text{ при } P_j\leqslant P_{\text{огр}\,j2};$$

$$\Delta P_{\text{огр}\,j}=0 \text{ при } P_{\text{огр}\,j2}<P_j<P_{\text{огр}\,j1},$$

где P_j — текущее значение перетока по контролируемой j-й связи, МВт; $P_{\text{огр}\,j1}$ и $P_{\text{огр}\,j2}$ — уставки ограничения перетока соответственно для положительного и отрицательного направлений, МВт.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Управляющее воздействие в режиме ограничения перетока по j-м связям определяется по формуле:

$$U_{\text{огр}j}=\int_{t_1}^{t_2} C_{\text{огр}j}\Delta P_{\text{огр}j}dt,$$

где $U_{\text{огр}j}$ — управляющее воздействие при ограничении в заданном направлении перетока мощности по j-м связям, МВт; $C_{\text{огр}}=\frac{1}{T_{\text{огр}j}}$ — коэффициент усиления по скорости, определяемый принятой постоянной интегрирования $T_{\text{огр}\,j}$, 1/с; $\Delta P_{\text{огр}\,j}$ — разность между фактическим значением перетока и уставкой на ограничение, МВт; t_1, t_2 — моменты времени, соответствующие началу и концу процесса ограничения.

В целях восстановления исходной мощности регулирующих электростанций при появлении резерва по пропускной способности контролируемой связи предусматривается процесс автоматического возврата ограничителей. Условия возврата:

$$U_{\text{огр}\,j}\neq 0;$$
$$P_{\text{в}j2}<P_j<P_{\text{в}j1},$$

где $P_{\text{в}j1}$, $P_{\text{в}j2}$ — уставки возврата ограничителя для перетока мощности соответственно в положительном и отрицательном направлении, связанные с уставками срабатывания на ограничение перетока соотношениями:

$$P_{\text{в}j1}=P_{\text{огр}\,j1}-\Delta P_{\text{в}};$$
$$P_{\text{в}j2}=P_{\text{огр}\,j2}+\Delta P_{\text{в}}.$$

Здесь $\Delta P_{\text{в}}$ — отстройка уставки возврата от уставок ограничения (выбирается обычно в пределах от 100 до 300 МВт).

Отклонение перетока в режиме возврата определяется выражениями:

$$\Delta P_{\text{в}j}=P_j-P_{\text{в}j1} \text{ при } U_{\text{огр}\,j}>0;$$
$$\Delta P_{\text{в}j}=P_j-P_{\text{в}j2} \text{ при } U_{\text{огр}j}<0;$$
$$\Delta P_{\text{в}j}=0 \text{ при } P_j>P_{\text{в}j1} \text{ или } P_j<P_{\text{в}j2}.$$

Управляющее воздействие в режиме возврата по j-м связям вычисляется по формуле:

$$U_{\text{в}j}=\int_{t_{\text{в}1}}^{t_{\text{в}2}} C_{\text{в}j}\Delta P_{\text{в}j}dt,$$

где $U_{\text{в}j}$ — управляющее воздействие в режиме возврата, МВт; $C_{\text{в}j}=\frac{1}{T_{\text{в}j}}$ — коэффициент усиления по скорости, 1/с; $\Delta P_{\text{в}j}$ — разность между фактическим значением перетока и уставкой на возврат, МВт; $t_{\text{в}1}$, $t_{\text{в}2}$ — времена начала и конца процесса возврата.

Расчет управляющих воздействий на ЦВМ производится суммированием сигналов приращения управляющего воздействия за все циклы расчета. Так, управляющее воздействие в режиме ограничения перетока по j-м связям для k-го объекта имеет вид:

$$(U_{\text{огр}j})_k=\sum_{n=1}^{z}\Delta U_{\text{огр}jn}(\gamma_{\text{огр}j})_k,$$

где n — номер цикла расчета; z — количество циклов расчета за период регулирования; $\Delta U_{\text{огр}\,jn}$ — сигнал приращения управляющего воздействия в режиме ограничения по j-м связям за n-й цикл расчета; $(\gamma_{\text{огр}\,j})_k$ — значение коэффициента долевого участия (КДУ) k-го объекта регулирования в режиме ограничения перетока по j-м связям.

Сигнал приращения управляющего воздействия в режиме ограничения перетока по j-м связям в n-м цикле для k-го объекта регулирования определяется выражением:

$$(\Delta U_{\text{огр}\,jn})_k=\Delta U_{\text{огр}\,jn}(\gamma_{\text{огр}\,j})_k,$$

а управляющее воздействие на k-й объект регулирования

$$(U_{\text{огр}j})_k=\sum_{n=1}^{z}(\Delta U_{\text{огр}jn})_k.$$

Сигнал приращения управляющего воздействия в режиме ограничения перетока по j-м связям в n-м цикле

$$\Delta U_{\text{огр}\,jn}=C_{\text{огр}\,j}\Delta P_{\text{огр}\,j}t_{\text{ц}},$$

где $t_{\text{ц}}$ — длительность цикла расчета, с.

Аналогично определяется управляющее воздействие в режиме возврата по j-м связям для k-го объекта:

$$(U_{\text{в}j})_k=\sum_{n=1}^{z}(\Delta U_{\text{в}jn})_k=\sum_{n=1}^{z}(\Delta U_{\text{в}jn}(\gamma_{\text{в}j})_k,$$

где

$$\Delta U_{\text{в}jn}=C_{\text{в}j}\Delta P_{\text{в}j}t_{\text{ц}}.$$

Коэффициенты долевого участия в режиме ограничения и возврата при отсутствии сигналов блокировок одинаковы. Распределение регулирующих электростанций по группам, объединенным общим знаком управляющего воздействия при срабатывании (или возврате) данного ограничителя перетоков, производится для каждого ограничителя отдельно; принадлежность электростанции к той или иной группе учитывается знаком ее коэффициента долевого участия. Значение КДУ электростанции назначается исходя из степени эффективности изменения мощности этой электростанции для разгрузки данной связи с учетом ее регулировочных возможностей.

Задание уставок АОП производится диспетчером вручную. Предусмотрена возможность изменения каждой из уставок ограничения перетока в полном диапазоне изменения перетока по линии электропередачи. Коэффициенты усиления по скорости в режиме ограничения и возврата задаются также вручную. Как правило, режим возврата осуществляется медленнее, чем процесс ограничения. Дополнительно в системе регулирования предусмотрена возможность оперативного исключения режима возврата.

Режим автоматического регулирования частоты (АРЧ). Режим *АРЧ* предназначен для астатического поддержания частоты на заданном уровне при нормальных эксплуатационных колебаниях на-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

грузки. Критерий регулирования

$$\Delta f = 0,$$

где $\Delta f = f - f_{уст}$ — отклонение текущего значения частоты от заданного, Гц.

Величина управляющего воздействия в режиме регулирования частоты определяется по формуле:

$$U_f = \int_{t_{f1}}^{t_{f2}} C_f K_ч \Delta f dt,$$

где $K_ч$ — крутизна статической характеристики регулятора, МВт/Гц; $C_f = \frac{1}{T_ч}$ — коэффициент усиления по скорости, определяемый постоянной интегрирования $T_ч$, 1/с; t_{f1}, t_{f2} — моменты времени начала и конца процесса регулирования, с.

Величина управляющего воздействия в режиме регулирования частоты для k-го объекта определяется выражением:

$$(U_f)_k = \sum_{n=1}^{z} \Delta U_{fn} (\gamma_f)_k,$$

где n — номер цикла расчета; z — количество циклов расчета за период регулирования; ΔU_{fn} — сигнал приращения управляющего воздействия в режиме *АРЧ* за n-й цикл расчета, МВт/цикл; γ_{fk} — значение КДУ k-го объекта регулирования в режиме *АРЧ*.

Значение сигнала приращения управляющего воздействия в режиме *АРЧ* в n-м цикле для k-го объекта регулирования

$$(\Delta U_{fn})_k = \Delta U_{fn} (\gamma_f)_k.$$

Управляющее воздействие в режиме *АРЧ* для k-го объекта

$$(U_f)_k = \sum_{n=1}^{z} (\Delta U_{fn})_k,$$

где сигнал приращения управляющего воздействия в режиме *АРЧ* в n-м цикле рассчитывается по формуле:

$$\Delta U_{fn} = -C_f K_ч \Delta f t_ц.$$

В качестве датчика частоты используется разработанный ЦДУ ЕЭС СССР датчик-преобразователь промышленной частоты (*ППЧ*), стабилизированный кварцевым резонатором. Отклонения фактической частоты от 50 Гц, получаемые с датчика, вводятся в ЦВМ, где сравниваются с заданной уставкой. Регулирование частоты производится путем одностороннего воздействия на электростанции, участвующие в регулировании. Уставка по частоте задается вручную, ступенями по 0,01 Гц в диапазоне от 49 до 51 Гц. В опытной системе ЦфАРЧМ реализован режим автоматического регулирования частоты с постоянным (не меняющимся при отклонениях частоты) коэффициентом усиления по скорости; однако возможность осуществления нелинейного регулирования системой предусмотрена.

Распределение внепланового задания между объектами регулирования. Распределение внеплановой нагрузки между объектами регулирования производится в соответствии со знаками и значениями КДУ, которые задаются независимо по каждому виду регулирования. Они заранее устанавливаются диспетчером вручную, а в процессе регулирования вычисляются и корректируются автоматически на основании логики управления при взаимодействии алгоритмов, действии защит и блокировок.

Для каждого режима регулирования (*АРЧ* или *АОП*) предусмотрены два способа задания и коррекции КДУ. Они обеспечивают автоматическое изменение КДУ без вывода из работы системы ЦфАРЧМ и без изменения ранее накопленного задания на объектах регулирования. Выбор способа осуществляется диспетчером.

Первый способ. Коэффициенты долевого участия всех подключенных к системе ЦфАРЧМ объектов регулирования устанавливаются и корректируются диспетчером вручную. Коэффициенты долевого участия объектов, отключаемых от систем ЦфАРЧМ вручную или автоматически, автоматически устанавливаются равными нулю. При последующем подключении объекта к системе ЦфАРЧМ значение его КДУ автоматически принимает значение, соответствующее ранее заданному.

Второй способ. Все значения КДУ устанавливаются диспетчером вручную и сумма их для каждого вида регулирования равна единице.

При коррекции КДУ одного из объектов для данного вида регулирования вручную диспетчером или автоматически от внешнего сигнала все КДУ этого вида регулирования остальных объектов меняют свои значения автоматически пропорционально ранее установленным значениям, но так, что их сумма равна единице. Это имеет место и в том случае, когда КДУ объекта оказывается равным нулю.

Пересчет КДУ при изменении состава действующих объектов производится автоматически по следующему выражению:

$$(\gamma_{огрj})_k = \frac{(\gamma_{огрj})_{к.з}}{\sum_{k=1}^{m} (\gamma_{огрj})_{к.з}},$$

где $(\gamma_{огрj})_k$ — скорректированное значение КДУ k-го объекта при изменении состава работающих объектов; $(\gamma_{огрj})_{к.з}$ — заданное значение КДУ объекта; $\sum_{k=1}^{m} (\gamma_{огрj})_{к.з}$ — сумма КДУ объектов, оставшихся в работе.

При определении скорректированного значения КДУ в приведенном выражении КДУ для регулирующих объектов, не участвующих в это время в данном виде регулирования, принимаются равным нулю.

Изменение внеплановой мощности объекта регулирования ручным корректором мощности (*РКМ*). Управление от *РКМ* осуществляется автономно по каждому объекту регулирования, подключенному к системе ЦфАРЧМ.

Сигнал задания внеплановой мощности от *РКМ* выдается в формирователь результирующего управляющего воздействия (*ФРУВ*) в каждом цикле расчета в виде сигнала приращения заранее установленной величины. В формирователе он сумми-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

руется с сигналами приращения по другим видам регулирования и, накапливаясь до заданного значения, образует сигнал задания внеплановой мощности для объекта. Внеплановая мощность, задаваемая объекту от *РКМ*, может изменяться в широких пределах ступенями по 1 МВт.

Формирователь результирующего управляющего воздействия для объекта регулирования предназначен для:

алгебраического суммирования на каждом цикле всех сигналов приращений управляющего воздействия для данного объекта тех видов регулирования, в которых он участвует, включая *РКМ*;

формирования результирующего управляющего воздействия для объекта регулирования путем суммирования приращений по циклам;

ограничения результирующего управляющего воздействия;

ограничения скорости изменения результирующего управляющего воздействия.

Результирующий сигнал приращений управляющего воздействия в n-м цикле по видам регулирования, в которых участвует k-й объект, определяется выражением:

$$(\Delta U_n)_k = \left[(\Delta U_{fn})_k + \sum_{j=1}^{m} (\Delta U_{\text{огр}jn})_k + (\Delta U_{PKM})_k \right].$$

Здесь m — количество ограничителей;
$(\Delta U_{PKM})_k$ — сигнал приращения управляющего воздействия в режиме *РКМ* за n-й цикл расчета для k-го объекта.

Результирующее управляющее воздействие за z циклов регулирования для k-го объекта определяется суммированием всех сигналов приращения управляющего воздействия за z циклов расчета:

$$U_k = \sum_{n=1}^{z} (\Delta U_n)_k.$$

Формирование результирующего управляющего воздействия для объекта регулирования осуществляется с учетом взаимодействия алгоритмов отдельных видов регулирования. Так, для объекта регулирования сигналы приращения по частоте или по возврату блокируются, если они направлены встречно сигналу приращения хотя бы одного *АОП*. Результирующее управляющее воздействие в качестве задания внеплановой нагрузки ЦВМ выдает через устройства сопряжения в передающие устройства телерегулирования объекта.

В системе ЦфАРЧМ защиты и блокировки действуют в следующих случаях [Л. 2]:

выделение объекта регулирования на изолированную работу или разделении ЕЭС на изолированно работающие части;

исчерпание регулировочного диапазона на объекте;

отключение системы регулирования объекта;

возникновение неисправности в каналах измерения перетока или телерегулирования;

возникновение неисправностей в устройствах системы АРЧМ объекта.

Управление системой и отображение информации. В состав технических средств общения с ЦВМ входят: электронно-лучевые трубки (*ЭЛТ*) типа ВТ-340 с универсальной и функциональной клавиатурами; электрические пишущие машинки (*ЭПМ*); световые табло; алфавитно-цифровое печатающее устройство (*АЦПУ*).

Управление системой регулирования осуществляется с двух пунктов: с рабочего места диспетчера ЦДУ ЕЭС, в оперативном управлении которого находится система ЦфАРЧМ, и с рабочего места персонала, обслуживающего ЦВМ.

С рабочего места диспетчера с помощью функционального пульта управления и *ЭЛТ* осуществляется оперативное управление системой (включение и отключение отдельных видов или объектов регулирования, назначение уставок по ограничению перетока и частоте, изменение мощности от *РКМ* и др.). Отображение информации осуществляется на экране дисплея «Видеотон-340». Кроме того, возникновение аварийной ситуации или работа *АРЧ* и *АОП* фиксируется на световом табло.

Информация на экран дисплея выдается в виде таблиц, содержащих постоянную составляющую информации (трафарет) и переменную часть (величина и направление перетоков, мощность регулирующих станций, величина и знак внеплановых заданий, уставки и т. п.).

Параметры системы. *В режиме АРЧ*: диапазон изменения уставки по частоте 49—51 Гц; дискретность задания уставки 0,01 Гц; диапазон изменения коэффициента усиления от 0 до 999 $\frac{\text{МВт}}{\text{с}\cdot\text{Гц}}$; *КДУ* объекта регулирования изменяется в пределах от 0 до 9,99; пределы внепланового задания мощности ±960 МВт; чувствительность по частоте при коэффициенте усиления 100 $\frac{\text{МВт}}{\text{с}\cdot\text{Гц}}$ и КДУ объекта, равным 0,1, составляет ±0,002 Гц; погрешность при расчете управляющих воздействий и их распределения между объектами регулирования при рассогласовывании сигналов на входе управляющего вычислительного комплекса, в 2—3 раза превышающем зону нечувствительности, не более 1%.

В режиме АОП: диапазон задания уставок ограничения перетока мощности ±2500 МВт, значение отстройки уставки возврата от уставки ограничения может измениться в пределах от 0 до 2500 МВт; дискретность задания уставки ограничения и отстройки возврата 20 МВт; диапазон изменения коэффициента усиления по скорости в режимах ограничения перетока и возврата от 0 до 9,99 1/с; пределы задания КДУ ±9,99; пределы задания внеплановой мощности объекта ±960 МВт; чувствительность по перетоку при значении КДУ равном 0,1, в режиме ограничения перетока составляет ±2 МВт, в режиме возврата ±5 МВт; погрешность при расчете управляющих воздействий и их распределения между объектами регулирования при рассогласовании, в 2—3 раза большем зоны нечувствительности, не превышает 1%.

В режиме РКМ: диапазон задания мощности объекта регулирования от *РКМ* ±960 МВт с дискретностью 1 МВт.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ФРУВ: значение допустимой максимальной скорости изменения результирующего воздействия ±9999 МВт/с с дискретностью задания 1 МВт.

Надежность работы системы проверялась путем выявления отказов при длительной непрерывной (по 10—12 ч в сутки) работе с максимальной загрузкой ЦВМ.

Заключение. Результаты внедрения экспериментальной цифровой системы АРЧМ показывают, что принятые в этой системе технические решения могут являться базой для создания цифровых систем АРЧМ на высших уровнях управления. В процессе разработки и пробной эксплуатации экспериментальной цифровой централизованной системы АРЧМ ЕЭС СССР уточнены требования к управляющему вычислительному комплексу, отработана система оперативного управления и отображения информации ЦфАРЧМ, получен опыт составления технологических алгоритмов системы АРЧМ и программирования, количественно оценена загрузка вычислительного комплекса задачей АРЧМ, решен ряд вопросов взаимодействия с телемеханикой и другими внешними устройствами.

Институтом Энергосетьпроект совместно с ЦДУ ЕЭС СССР ведутся работы по дальнейшему совершенствованию цифровой системы АРЧМ уровня ЕЭС СССР. Эти работы проводятся в двух направлениях:

совершенствование процесса автоматического управления режимом, повышения надежности управляющего вычислительного комплекса, улучшения системы общения и отображения информации и т. п.;

совершенствование технологических алгоритмов в целях повышения эффективности централизованной системы АРЧМ за счет использования возможностей, предоставляемых ЦВМ.

К вопросам, которые должны быть в первую очередь решены при совершенствовании технологических алгоритмов, относятся:

выявление места наиболее существенных отклонений от планового режима, вызывающих перегрузку контролируемых связей, и определение в соответствии с этим оптимальных управляющих воздействий;

оценка фактических статических частотных характеристик энергосистемы в целом и отдельных ее энергорайонов по параметрам текущего режима и их учет в целях оптимизации управления;

организация рационального использования регулировочных способностей тепловых электростанций при совместной работе в качестве регулирующих объектов — тепловых электростанций с мощными энергоблоками и гидростанций;

учет тенденции в изменении параметров для повышения эффективности регулирования и снижения вероятности неэффективного управления.

Опыт, полученный при разработке и внедрении экспериментальной системы и результаты работ по совершенствованию цифровой системы АРЧМ дали необходимые основания для принятия важных решений о создании иерархической цифровой системы управления режимами по частоте и активной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучкин М. Д. Автоматическое регулирование режима крупных энергообъединений по частоте и активной мощности. — Электричество, 1962, № 3, с. 21—24.

2. Автоматизация регулирования частоты и активной мощности в Единой энергетической системе СССР/ Беркович М. А., Комаров А. Н., Совалов С. А. и др. — Электричество, 1977, № 8, с. 1, № 6.

[20.11.1978]

УДК 63:621.311

Электрификация животноводства

Академик ВАСХНИЛ БУДЗКО И. А., доктор техн. наук СЛАВИН Р. М.
Москва

Социальный и экономический эффект электрификации зависит от того, какого предшествующего уровня достигла соответствующая отрасль хозяйства. Электрификация промышленности и транспорта получила свое развитие на индустриальной базе в условиях развитого, сложившегося еще в XIX и начале XX в. крупного машинного способа производства.

Иначе развивалось сельскохозяйственное производство и, в частности, животноводство. Вплоть до 50-х годов животноводство сохраняло характерные черты традиционного крестьянского хозяйства, и хотя фермы укрупнялись, в них по-прежнему господствовал ручной труд.

Только в последние 10—15 лет процесс электрификации совхозных и колхозных животноводческих ферм стал развиваться заметным образом. Но пока он еще не закончен. Так, в 1976 г. на молочных фермах процессы доения коров были электрифицированы на 85%, водоснабжения — на 84%, удаления навоза — на 61%, а раздачи кормов — всего на 33%. Лишь в свиноводстве и птицеводстве достигнуты более высокие показатели электрификации.

В то же время государство обеспечило сельское хозяйство надежной электроэнергетической базой. Давно прошло то время, когда сельское хозяйство получало электроэнергию от мелких, нередко «карликовых» электростанций. В 1977 г. сельское хозяйство получило 88,4 млрд. кВт·ч, из них 95% — от государственных сетей. Общая протяженность сельских сетей составляет сейчас 3,7 млн. км. Ежегодно вводится в строй 200 тыс. км новых сетей [Л. 1].

Общественное животноводство превратилось в массовую специализированную отрасль народного хозяйства. Валовая продукция животноводства составляет сейчас более половины всего производства в сельском хозяйстве [Л. 2]. За годы советской власти резко изменилась структура населения

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

нашей страны, и процент городского населения поднялся с 18% в 1913 г. до 62% в 1977 г.

Трудовые ресурсы для развития животноводства сейчас крайне ограничены. В то же время производство продуктов животноводства неуклонно растет.

Сейчас в общественном сельскохозяйственном производстве занято 23,3 млн. человек, из которых более 5,5 млн. работает в животноводстве. Рост производства продукции животноводства будет идти и впредь, но на увеличение числа работающих в этой отрасли рассчитывать нельзя. Отсюда вытекает важная задача всемерного повышения производительности труда на базе прогрессивных технологий животноводства, механизации, электрификации и автоматизации производства.

Июльский (1978 г.) Пленум ЦК КПСС в своем Постановлении подчеркнул, что сейчас на первый план выдвигается задача быстрого развития животноводства. Необходимо последовательно переводить животноводство на промышленную основу и превратить его в современную высокоэффективную отрасль.

В настоящее время в СССР проводится специализация и концентрация производства молока, мяса, яиц. Осуществляется переход животноводства на промышленную основу, создаются крупные комплексы по производству молока, говядины, свинины, яиц, мяса птицы. По потреблению электроэнергии, объему и сложности электрооборудования такие комплексы приближаются к предприятиям промышленности. Так, например, комплекс на 108 тыс. годового откорма свиней включает около 40 систем автоматизированных электроприводов, 12 силовых трансформаторов по 630 кВ·А, 260 щитов и пультов управления. На комплексе используется более 1200 электродвигателей, 2 тысячи инфракрасных обогревателей, 500 первичных преобразователей в системах автоматического управления приготовления и раздачи кормов, уборки навоза, отопления и вентиляции и т. д. [Л. 3].

Установленная мощность оборудования на комплексе или птицефабрике достигает 10—12 МВ·А. Многие совхозы и колхозы имеют сейчас по 700—800 электродвигателей на общую мощность до 3,5—4 МВт.

Нередко мощность только производственных электроустановок совхоза или колхоза достигает и даже превышает суммарную мощность его машинно-тракторного парка.

Быстро развивается система машин для животноводства, которая насчитывает ныне свыше 500 наименований, а доля электрифицированных машин в общем их парке превышает ныне 70%.

Сейчас в электрификации животноводства используется свыше 5 млн. электродвигателей — половина всего количества, применяемого в сельском хозяйстве. Электрическая энергия используется не только для привода машин на фермах, но и непосредственно в технологических процессах: технологическом освещении, производстве тепла и холода, пастеризации продукции, облучения животных и птицы. Ежегодно машины и оборудование для животноводства потребляют свыше 20 млрд. кВт·ч электроэнергии.

На основе электрификации за период 1965—1977 гг. резко возросла производительность труда в животноводстве; затраты труда на производство молока сократились в 1,6—1,9, на производство говядины в 1,5—1,72, на производство свинины в 1,9—2,1, на производство яиц — в 2—4,5 раза. Только за последние 7 лет уровень комплексной механизации на фермах крупного рогатого скота вырос с 9 до 33%, в свиноводстве — с 23 до 58%.

Преобладающее место в системе машин для животноводства уже сейчас занимают электрифицированные установки. Они все больше и больше вытесняют средства механизации, основанные на тракторной энергетике. Электропривод машин для животноводства быстро развивается в направлении специализации, автоматизации, перехода от автономных и разрозненных установок к системному электроприводу. Все более широко практикуется комплектное изготовление и поставка хозяйствам всего электрифицированного технологического оборудования, выполняемого в виде единой системы, преимущественно поточного типа. По такому принципу осуществляются поточные установки для приготовления и раздачи кормов — сухих, сочных, жидких, искусственного молока; подъема и распределения воды; уборки и переработки навоза и помета, доения коров и первичной переработки молока; сбора и обработки яиц и т. д.

В электрификации животноводства применяют, как правило, короткозамкнутые трехфазные двигатели, наиболее простые, дешевые и надежные, с единичной мощностью, обычно не превышающей 50 кВт. Вместе с тем массовый характер сельскохозяйственного производства диктует свои требования к электрооборудованию. Оно должно надежно работать при значительных перепадах окружающей температуры; в условиях высокой относительной влажности воздуха; при содержании в нем пыли, аммиака, сероводорода. В сельских низковольтных сетях наблюдаются значительные отклонения напряжения, особенно при протекании пусковых токов, высокая несимметрия напряжения. Это обусловливает повышенные требования к пусковым и максимальным моментам двигателей, создает опасность перегрева изоляции, «опрокидывания» двигателя. Необходимо также учесть особенности эксплуатации техники в сельском хозяйстве: не всегда достаточный уровень квалификации персонала, хранение оборудования в неотапливаемых помещениях и под навесами, возможность обработки водой и дезинфицирующими растворами.

В то же время для животноводства особенно важны автоматизированные установки, работающие при периодическом наблюдении персонала или вовсе ненаблюдаемые. К ним относятся, например, многочисленные башенные, пневматические и прямоточные насосные установки сельскохозяйственного водоснабжения, установки для раздачи кормов и удаления навоза, оборудование вентиляции и отопления и т. д. Только в системе сельскохозяйственного водоснабжения действуют сотни тысяч таких установок. К автоматическим установкам без персонала предъявляются особо высокие требования в отношении их надежности, защиты от

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

повреждений, эксплуатации при неблагоприятных условиях окружающей среды.

Опыт показал, что перечисленные особенности ограничивают применение в животноводстве общепромышленных двигателей. Так, если срок службы двигателя до капитального ремонта составляет в промышленности 8—10 лет, то в животноводстве он сокращается до 1—3 лет, причем около одной трети повреждений вызывает влажная и агрессивная среда животноводческих помещений. В частности, при использовании общепромышленных двигателей для привода машин в животноводстве сроки их службы (по процессам) составляют: раздача кормов — 1,3, уборка навоза — 1,3, доение — 2,1, водоснабжение — 2,5, вентиляция — 2,6, кормоприготовление — 2,7 года [Л. 4]. Свыше 70% электродвигателей, выходящих из строя в сельском хозяйстве, приходится на двигатели, установленные в животноводческих помещениях. Важным достижением электропривода явилась разработка и широкое внедрение электродвигателей сельскохозяйственной модификации, специальных электродвигателей для привода регулируемых электровентиляторов, мотор-редукторов, погружных электронасосов, приводов со встроенной температурной защитой; комплектных станций управления, в том числе с автоматическим программным управлением.

Серия электродвигателей сельскохозяйственной модификации химовлагоморозостойкого исполнения рассчитана на условия животноводческих ферм: температуру ±40°, относительную влажность воздуха до 98%, содержание аммиака 0,03, сероводорода 0,03, углекислого газа 14,7 и летучей соломистой или хлопьевидной пыли до 1,16 г/м³. Допускается повышение концентрации аммиака до 0,09 г/м³ в течение 5 ч в сутки. Двигатели обладают повышенными пусковыми и перегрузочными моментами, допускают работу при пониженном напряжении, могут снаружи обмываться водой. До минимума сокращены необходимые операции по их техническому обслуживанию [Л. 3].

Применение мотор-редукторов и двигателей, непосредственно встроенных в электрифицированные агрегаты (насосы, измельчители и т. п.), существенно улучшает компоновку машин, их весовые показатели, сокращает габариты установок, облегчает и удешевляет монтаж и эксплуатацию, улучшает энергетические показатели всего технологического процесса.

Переход в животноводстве к машинным технологиям настоятельно требует развития регулируемого электропривода. Первое массовое применение он нашел в технике управления микроклиматом животноводческих помещений. Для их вентиляции используют низконапорные осевые вентиляторы, приводимые от регулируемых двигателей, специально разработанных для этих целей. Изменяя питающее напряжение с помощью трехфазного автотрансформатора с отпайками или тиристорного регулятора, можно в широком диапазоне ступенями или плавно регулировать частоту вращения вентиляторов. При помощи отрицательной обратной связи по скорости можно существенно расширить диапазон регулирования и обеспечить большую стабильность скоростей. Отличаясь максимальной простотой, такой способ регулирования связан, однако, с высокими потерями скольжения, выделяемыми в роторе, вследствие чего применительно к короткозамкнутым двигателям его используют лишь при мощности до 1 кВт и только при вентиляторном моменте нагрузки.

Животноводству необходимы регулируемые приводы с мощностью до нескольких десятков киловатт, такие приводы должны работать не только с вентиляторным, но и с постоянным моментом сопротивления. Отсюда вытекает необходимость разработки типоразмерного ряда регулируемых приводов сельскохозяйственного назначения. Спорадическое использование в данных условиях регулируемых муфт скольжения, многоскоростных двигателей с переключением полюсов, двигателей с фазным ротором, механических вариаторов и т. п. нельзя признать исчерпывающим решением задачи.

Важно особо подчеркнуть ту преобразующую роль, которую играет электропривод в развитии техники животводства. В отличие от промышленности, где электрификация развилась на сложившейся базе машинного производства, в животноводстве электрификация во многих случаях означает одновременно и механизацию, переход от ручного труда к машинному способу производства. В других случаях электродвигатель приходит на смену трактору или самоходному шасси, т. е. место мобильной машины с водителем на борту занимает автоматический стационарный электропривод. Это ведет к коренным изменениям рабочих органов, технологических приемов производства, организации рабочего процесса.

Принципиальное преимущество электрифицированного процесса — возможность его автоматизации и осуществления по поточному принципу. Это особенно важно в связи с переводом животноводства на промышленную основу, когда в хозяйстве резко возрастет интенсивность материальных и энергетических потоков.

Построение в животноводстве непрерывных электрифицированных поточных процессов ведет к глубоким структурным и функциональным преобразованиям всего производства, построенного ранее на ручном труде или тракторной энергетике. Поточный принцип обеспечивает прежде всего непрерывность процессов, а это позволяет сократить емкости накопительных и регулирующих бункеров, мощность приводов, металлоемкость технологического оборудования, ликвидировать неоправданное скопление продукта или перерабатываемого материала. Так, переход от набора бункерных кормушек с механизированной загрузкой к автоматизированном кормораздатчику транспортерного типа дает сокращение его металлоемкости в десятки раз и заметную экономию производственной площади. А ведь современный цех птицефабрики имеет протяженность автоматизированного фронта кормления 30—50 км и более.

Автоматизация водоснабжения позволяет отказаться от сооружения дорогих водонапорных башен или наземных накопительных резервуаров и перейти к наиболее экономичным безбашенным — пневматическим и прямоточным системам. Поточные транспортерные системы уборки освобождают хо-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

зяйства от скопления навоза, что улучшает санитарное состояние хозяйства. При переходе к непрерывному процессу, к регулируемому потоку ликвидируются многочисленные погрузочно-разгрузочные и перевалочные операции, резко повышается производительность труда [Л. 5].

В отличие от средств механизации, основанных на тракторной энергетике, автоматизированные установки с электроприводом могут работать непосредственно в зоне размещения животных или птицы. Благодаря этому становятся ненужными широкие транспортные проходы и маневровые площадки, которые отнимают от 10 до 30% полезной площади животноводческих или птицеводческих помещений и увеличивают примыкающие к ним полосы земли; увеличивается плотность размещения животных в расчете на 1 м² пола и уменьшается площадь застройки фермы. Оказывается возможным перенести рабочие органы машин внутрь технологического оборудования, что дополнительно улучшает использование производственной площади. Отсутствие человека в зоне выполнения рабочих операций позволяет проектировать автоматическое оборудование, руководствуясь только технологическими факторами. При этом отпадают требования удобства работы и безопасности. Такой принцип играет важную роль при устройстве заглубленных автоматизированных насосных станций, встроенных кормораздаточных линий, клеточных батарей для птицы и свиней, помещений для автоматизированного откорма мясного скота и др.

Механизация на основе тракторных орудий обусловливает определенные принципы генеральной и внутренней планировки ферм. К ним относятся павильонная застройка, т. е. разобщение, территориальное удаление друг от друга всех объектов фермы, «плоская», на одном уровне с землей, технология, развитая сеть дорог. Помещения снабжаются широкими воротами, служебными проходами и свободными торцевыми участками для въезда и выезда машин.

Автоматизированное поточное производство позволяет осуществить компактную генеральную планировку фермы, вплоть до объединения всех помещений под общей крышей. Это резко сокращает протяженность и стоимость сооружения всех инженерных коммуникаций, затраты на транспорт, обслуживание техники и управление производством. Особенно важно, что при таком решении резко сокращается площадь застройки, т. е. уменьшается изъятие сельскохозяйственных угодий. Так, например, крупная бройлерная фабрика при традиционной технологии занимает площадь до 500 га. При переходе к автоматизированной технологии выращивания бройлеров в электрифицированных клеточных батареях площадь застройки сокращается в 10—20 и более раз.

В наиболее интенсивных отраслях — свиноводстве, птицеводстве и овцеводстве — электрификация открывает возможность «объемной» технологии, основанной на содержании животных и птицы в автоматизированных многоярусных клеточных батареях. Подобно тому, как переход в градостроительстве от одно- к многоэтажной застройке совершенно изменил облик городов, так и в животноводстве переход от «плоской» к «объемной» технологии знаменует собой принципиально новый этап в развитии отрасли.

Трудно назвать другую отрасль материального производства, где электрификация обеспечивала бы такие высокие темпы технического прогресса. Электрификация коренным образом совершенствует всю технологию животноводства, изменяя архитектурно-планировочные решения ферм и внутреннюю планировку животноводческих помещений, способы и технические средства выполнения основных производственных процессов, содержание и организацию труда на фермах.

В текущей пятилетке животноводству поставляется электрооборудования на 9 млрд. руб. Такой размах требует не только специализации оборудования, но и его унификации, максимальной типизации технических решений. Это особенно важно в деле автоматизации, где несмотря на расширяющийся перечень технических средств до сих пор нет типовых решений, применяемых для промышленного животноводства. Так, при наличии более 20 типоразмеров уровнемеров и сигнализаторов уровня нет подходящих приборов для непрерывного и даже периодического контроля уровня зерна, комбикорма, корнеплодов, навоза, воды. Нет расходомеров и весовых дозаторов для большинства сельскохозяйственных продуктов. По существу, в отрасли пока нет упорядоченной системы необходимых элементов автоматики — первичных преобразователей, усилителей, исполнительных механизмов, типовых регуляторов, программных командоаппаратов и т. д. Вместе с тем, за счет типизации, унификации и специализации можно на 10—15% сократить затраты на средства автоматизации. Только в промышленном свиноводстве это может составить экономию от 80 до 200 млн. руб.

Особо важную роль в животноводстве играет техника микроклимата. В промышленном производстве свинины, яиц и мяса птицы, в технологии выращивания молодняка от параметров микроклимата нередко зависит весь производственный результат. Затраты на оборудование и эксплуатацию электрифицированных систем микроклимата занимают заметную долю в общих затратах; отметим, например, что в птицеводстве расход электроэнергии на освещение и вентиляцию заметно превышает потребление энергии всеми остальными электроустановками хозяйства, вместе взятыми. Укрупнение и концентрация производства ведут к резкому увеличению производительности и мощностей установок микроклимата.

Параметры микроклимата — температура, относительная влажность и газовый состав воздуха, освещенность, механическая и бактериальная загрязненность, уровень шума — оказывают сильное воздействие на животных. Отклонение параметров микроклимата от оптимальных значений приводит к существенному экономическому ущербу. В то же время в процессе управления микроклиматом помещения для интенсивного животноводства испытывают сильные внешние и внутренние возмущения. Так, температура наружного воздуха изменяется от —40° зимой до +35° летом, мощность потока радиации открытого неба достигает 800—1000 Вт/м²

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

и более, а внутренние выделения животного тепла в помещении с размерами 18×96×3 м составляют 400—800 тыс. ккал/ч. По интенсивности тепловыделений такие животноводческие помещения должны быть отнесены к категории горячих цехов с высокой теплонапряженностью.

В то же время зоотехнические требования диктуют весьма жесткие ограничения по всем параметрам микроклимата. Это заставляет разрабатывать все более совершенные системы автоматического управления микроклиматом, где используются полупроводниковые регуляторы температуры и относительной влажности воздуха, регулируемые в широком диапазоне электроприводы вентиляторов, калориферы и увлажнители воздуха. Разрабатываются достаточно сложные алгоритмы автоматического связного управления микроклиматом по нескольким параметрам и каналам, которые обеспечивают контролируемые температуру и влажность воздуха, его газовый состав, избыточное давление в помещении.

Проводятся производственные опыты по групповому управлению электровентиляторами с помощью тиристорных и электромашинных преобразователей частоты. Управление освещением в промышленном птицеводстве также автоматизировано и осуществляется по динамической программе продолжительность до 400 суток с непрерывным изменением продолжительности светового дня на протяжении всего технологического цикла по заданному графику.

От техники микроклимата требуется максимальная надежность. Так, при нарушении в безоконном здании действия вентиляции в летний период относительная влажность через 30 мин достигает 100% при одновременном росте температуры. Отключение вентиляции инкубаторов может вызвать гибель всех яиц из-за перегрева. Отключение обогрева или недостаток тепла в помещениях для молодняка птицы и свиней вызывает их массовый падеж. Срывы светового режима в птичнике могут привести к полной потере продуктивности птицы. Поэтому в технике микроклимата в первую очередь находят применение изделия высокой надежности— современные элементы автоматики и бесконтактные схемы управления.

В крупных многоярусных помещениях животные или птицы должны равномерно размещаться по всему объему, в каждой точке которого должны обеспечиваться оптимальные, контролируемые параметры микроклимата. Такое решение проблемы оптимального микроклимата открывает принципиально новые возможности в создании крупных животноводческих цехов. Сейчас увеличение вместимости помещения достигается только за счет увеличения площади застройки или путем перехода к многоэтажной конструкции здания. Однако многоэтажное здание с дорогими междуэтажными перекрытиями не имеет существенных технико-экономических преимуществ перед современными конструкциями крупных помещений в одноэтажном исполнении. Весьма перспективное направление — ярусная или объемная электромеханизация клеточного содержания животных или птицы, основу которой составляют объемные пространственные батареи с несколькими ярусами для содержания животных и трапами для технологического обслуживания. При таком решении достигаются максимальная плотность и вместимость помещения при минимальной стоимости строительства и наиболее высоком уровне механизации и автоматизации всех производственных процессов. На этом принципе построен ряд крупных птичников на 40—50 тыс. кур каждый. В ближайшие годы на основе объемной механизации будут созданы, например, птичники-автоматы на 200—300 и более тысяч кур-несушек. Отсутствие в таких зданиях тяжелых междуэтажных перекрытий не только заметно удешевляет его, но и позволяет осуществить механизацию на всех ярусах как единую систему поточных взаимосвязанных процессов.

Нетрудно заметить, что в переходе от павильонной застройки с разрозненными помещениями к компактным цехам главную роль сыграло изменение энергетической базы производства — переход от тракторной энергетики к электричеству.

Особое значение в условиях интенсивной поточной технологии животноводства приобретают управление материальными и энергетическими потоками, в том числе автоматическое. Построение поточного производства в животноводстве имеет много общих черт с промышленностью. Однако, в отличие от линий станков, поточные линии животноводства основаны на взаимодействии технических средств и организмов животных. Это обусловливает ряд их существенных особенностей. Так, во многих случаях поточные процессы в животноводстве имеют не детерминированный, а случайный характер. Поэтому при разработке линий должны применяться вероятностные методы расчета и специальные способы управления случайными потоками подачи или расхода.

Например, для расчета разветвленных линий сбора, укладки и обработки яиц необходимо применять современные методы теории массового обслуживания. Без теории случайных функций нельзя рассчитать современные линии водоснабжения, доения коров, приготовления кормов. Расчеты режимов поточных процессов в животноводстве нередко связаны со значительными вычислительными трудностями. Прочно вошли в практику такой расчетной работы ЦВМ.

Существенно сложнее, однако, изучение процессов прямого взаимодействия технических средств с животными. Здесь мы еще не научились формализовать задачи и моделировать наблюдаемые явления. Такая картина чрезвычайно сложна, она включает факторы биологии, зоопсихологии, биофизики и биохимии, требует постановки опыта в рамках биолого-инженерного исследования. В этой области делаются еще первые шаги. Таково, например, изучение реакций животных в условиях механизированного производства, получение объективной информации о внутреннем состоянии или продуктивности животного.

Отдельная крупная проблема — это использование методов генетики для выведения животных или птицы, наилучшим образом отвечающих требованиям механизированного производства. Важная особенность поточного производства в животноводст-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ве — высокая мощность (интенсивность) потоков, необходимость их точного динамического равновесия, принципиальная недопустимость «остановки» поточного процесса. В отличие от линий станков мы не можем «отключить» животных и соответствующие потоки тепла, влаги, углекислоты, корма, навоза, воды. Известны примеры, когда нарушение динамического равновесия в технологической поточной паре в течение считанных минут приводит к аварийной ситуации (нарушение светового режима, действия вентиляции, обогрева в помещениях для молодняка).

В других процессах перерывы, казалось бы, возможны. Однако надо учесть, что при поточном, непрерывном производстве резко сокращаются паузы в производственном процессе и, наоборот, увеличивается машинное время. В этих условиях каждый перерыв — это серьезное нарушение графика, так как для «наверстывания» пропущенной части технологической программы времени либо недостаточно, либо нет вовсе. Такое положение сложилось, например, в процессах доения коров на доильных площадках, раздачи кормов, сбора и обработки яиц на современных автоматизированных птицеводческих комплексах, где на счету каждая минута рабочего времени. Для таких процессов и соответствующих установок в обязательном порядке должно предусматриваться сетевое или местное энергетическое резервирование. При возможности технологического резервирования вопрос выбора между последним и энергетическим резервированием или их сочетания производится на основе экономического расчета всей совокупности процессов данного производственного участка.

Большое значение имеет формирование суточных графиков нагрузки. Развитие малоемкостных и прямоточных процессов резко увеличивает максимальные (пиковые) мощности установок. Для более равномерной загрузки питающих сетей необходимо шире использовать сдвинутые графики производства, правильное совмещение энергоемких процессов во времени. Это нередко приходит в противоречие с социальными интересами (работа в ночное или вечернее время, непрерывная неделя). Автоматизация процесса, вплоть до полного высвобождения из него человека, позволяет беспрепятственно формировать оптимальные графики на протяжении суток.

Объединение ряда ранее разрозненных автономных процессов в единую систему с централизованным диспетчерским или автоматическим управлением, использованием программных приборов и автоматических регуляторов — важный этап электрификации животноводства. Компактная планировка ферм и исполнение крупных животноводческих цехов под общей крышей создали для этого необходимые предпосылки, а переход к интенсивным малоемкостным и прямоточным процессам сделали такое решение единственно возможным. По такому принципу начинают строить современные поточные технологии доения коров, приготовления и раздачи корма, уборки и переработки навоза, сбора и обработки яиц. Такие системы включают до нескольких десятков и даже сотен автоматизированных приводов. Однако это только первый шаг, поскольку объединенные поточные линии образуют систему лишь в рамках данного процесса. Несмотря на многочисленность оборудования, такое устройство в целом образует функционально простую систему.

Важная особенность процессов животноводства — это их зависимость друг от друга. Крупное стадо животных или птицы связывает основные процессы на ферме в единую функционально сложную систему. Современная задача электрификации производства в животноводстве — это системная, многофакторная задача, со множеством перекрестных связей.

Отсюда следует задача системного управления всем ходом производства. Традиционное управление основано на стремлении к независимости, разделению всех основных механизированных процессов (принцип автономии). Сейчас рождаются новые методы и технические средства автоматизации производства. В отличие от существующих методов управления, основанных на задании ряда постоянных технологических параметров, их автоматической стабилизации, будут развиты сложные управляющие системы, работающие по динамическим программам, автоматически вырабатываемым на основе текущей информации в ходе самого производства. В такой системе необходимо автоматически получать на машинном носителе информацию о состоянии животных.

Так, например, информация о текущей продуктивности коров, яичной птицы или привеса мясного скота, свиней или бройлеров будет автоматически вводиться в систему управления для выработки оптимальных программ и рационов кормления, поения, микроклимата, светового режима, сроков забоя или замены стада, работы убойных цехов, холодильников, транспорта, ветеринарных мероприятий и т. д. Новые методы управления, основанные на переработке значительных объемов технологической информации с помощью ЦВМ, позволят не только оптимизировать весь ход производства, но и прогнозировать его. Ожидают, что оптимальное управление позволит дополнительно на 8—10% сократить себестоимость продукции животноводства и птицеводства. Такие автоматизированные системы управления разрабатываются сейчас для крупных животноводческих комплексов и птицефабрик.

Из изложенного можно заключить, что в быстром движении животноводства по пути научно-технического прогресса электричество играет ведущую роль. Однако реализовать преимущества использования электроэнергии в современном животноводстве можно только при существенном повышении качества электроснабжения. Для этого необходимо в первую очередь обеспечить высокую надежность подачи электроэнергии, так как отключение животноводческих предприятий, в особенности крупных, ведет к значительным потерям продукции, а главное, вызывает заболевания и даже гибель животных и птицы. Поэтому для комплексов по промышленному производству животноводческой продукции и для птицефабрик установлена первая категория обеспечения надежности электроснабжения, которое должно осуществляться от двух независимых источников питания, и перерыв его

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

может быть допущен лишь на время автоматического ввода резервного питания. Кроме того, особо ответственные электроприемники требуют дополнительного резервирования от собственных резервных электростанций, сооружаемых на каждом крупном предприятии.

Обычные животноводческие фермы в отношении надежности электроснабжения отнесены ко второй категории и, следовательно, как правило, не имеют резервного питания. Здесь необходимо осуществлять весь комплекс мероприятий, обеспечивающих в текущей пятилетке суммарную продолжительность аварийных и плановых отключений не более 15 ч в год и продолжительность одного отключения не более 2—3 ч.

Не менее важно обеспечить надлежащее качество напряжения на животноводческих объектах. Как известно, в сельском хозяйстве допустимые отклонения напряжения приняты в пределах $\pm 7{,}5\%$ против $\pm 5\%$ в промышленности. Однако в животноводческих комплексах и на птицефабриках при наличии ответственного электрооборудования и автоматических устройств уже в настоящее время обеспечиваются отклонения напряжения по промышленным нормам. Очень важно, чтобы они не нарушались в процессе эксплуатации.

До недавнего времени вследствие небольшой мощности сельскохозяйственных объектов в сельских сетях не уделялось необходимого внимания регулированию реактивной мощности. Теперь в первую очередь на крупных сельскохозяйственных предприятиях промышленного типа необходимо осуществлять компенсацию реактивной мощности, доводя коэффициент мощности до значения, рекомендуемого в промышленности.

Электрификация животноводства на базе высококачественного электроснабжения обеспечивает быстрое и эффективное развитие этой важной отрасли сельского хозяйства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Будзко И. А.** Рациональное электроснабжение и повышение эффективности электрификации. — Вестник сельскохозяйственной науки, 1977, № 11.
2. **Народное** хозяйство СССР в 1977 г. М.: Статистика, 1977.
3. **Рослов Ю. А.** Развитие системы электрооборудования для сельскохозяйственного производства. — Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства, 1972, № 3.
4. **Назаров Г. И.** Основные направления научных исследований в области сельскохозяйственного электропривода. — Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства, 1972, № 3.
5. **Славин Р. М.** Научные основы автоматизации производства в животноводстве и птицеводстве. М.: Колос, 1974.

[4.12.1978]

УДК 621.311.001.57

Многофакторные модели прогнозирования показателей развития электрических сетей энергосистем

Доктор техн. наук АРЗАМАСЦЕВ Д. А., канд. техн. наук МАРДЕР Л. И., инж. МОРОЗОВА Н. С., канд. техн. наук МЫЗИН А. Л.

Свердловск

При прогнозировании развития народного хозяйства и энергетики возникает потребность в определении объемов электросетевого строительства в стоимостном и натуральном выражениях (протяженностей линий электропередачи по ступеням напряжения, мощностей силовых трансформаторов, расходов цветного и черного металлов и др.). Применение для этих целей моделей, которые основаны на непосредственной оптимизации конфигурации электрических сетей на срок свыше 5 лет, в большинстве случаев представляется малоэффективным из-за отсутствия надежной информации по территориальному размещению потребителей и генерирующих мощностей на отдаленную перспективу.

Одним из направлений исследований по созданию эффективных методов прогнозирования развития сетей энергосистем является разработка статистических электросетевых моделей (ЭСМ). Такие модели предназначены для долгосрочного прогнозирования объемов электросетевого строительства с использованием в качестве информационной базы показателей развития энергосистем, которые определяются на верхних уровнях территориально-временной иерархии.

В отличие от [Л. 1] в данной статье исследуются новые разновидности моделей объемных показателей электросетевого строительства, базирующихся на использовании многомерного статистического анализа и позволяющих более полно учитывать накопленную информацию по развитию энергосистем.

В качестве моделируемых показателей электрических сетей рассмотрены суммарные протяженности линий электропередачи и мощности трансформаторов подстанций по ступеням напряжения для зон объединенных энергосистем. При формировании моделей использована статистическая информация по четырем энергосистемам за период с 1960 по 1977 гг.

На развитие электрических сетей оказывает влияние большое число параметров, характеризующих как энергетические, так и экономико-географические условия энергосистем. При построении ЭСМ исследована совокупность пятнадцати параметров, к которым отнесены: площадь территории $П$; численность населения H, в том числе — городского $H_г$ и сельского $H_с$; количество городов с численностью населения свыше 15 и 100 тыс. чел. n_{15} и n_{100}; суммарная установленная мощность электростанций $N_{уст}$, в том числе — гидроэлектростанций $N_{уст}^{ГЭС}$, теплоэлектроцентралей $N_{уст}^{ТЭЦ}$ и конденсационных электростанций $N_{уст}^{КЭС}$; наибольшие единичные мощности электростанций $N_{ст}$ и агрегата $N_{бл}$; годовая выработка электроэнергии $Э_{выр}$; элек-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

тропотребление $Э_{потр}$; максимальная электрическая нагрузка потребителей P_{max}.

Корреляционный анализ показал наличие сильных корреляционных связей между многими из перечисленных параметров. Это вызывает большие трудности при построении регрессионных моделей, связанные с устранением мультиколлинеарности переменных [Л. 2]. Исследования показали, что по указанной причине в регрессионных моделях прогнозирования протяженностей линий электропередачи L и мощностей трансформаторов подстанций W не удается учесть более четырех влияющих параметров [Л. 1]. При этом имеют место значительные потери информации. Для более полного учета совокупности параметров, влияющих на развитие электросетевых объектов, целесообразно применение специального метода многомерного статистического анализа — факторного анализа [Л. 3 и 4]. Его сущность заключается в следующем.

Наблюдения статистического комплекса можно интерпретировать как векторы в n-мерном пространстве параметров. С помощью факторного анализа, используя наличие корреляционных связей между параметрами, можно осуществить переход в ортогональное пространство меньшей размерности k и заменить параметры некоррелированными факторами. В результате создаются условия для применения аппарата регрессионного анализа. Учитывая отмеченные особенности, указанный метод моделирования назовем факторно-регрессионным.

Процесс построения моделей можно разбить на ряд этапов. На первом из них осуществляется переход от параметров к факторам. Факторная модель в матричных обозначениях выражается следующим образом:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{A}\,|\,\mathbf{D}\left\|\begin{matrix}\mathbf{F}\\ \mathbf{V}\end{matrix}\right\|, \qquad (1)$$

где $\mathbf{x}'$ — нормированные исходные параметры; $\mathbf{A}$ и $\mathbf{D}$ — матрицы коэффициентов (нагрузок) при общих $\mathbf{F}$ и характерных $\mathbf{V}$ факторах. Пренебрегая характерными факторами, обусловливающими остаточную вариацию, получим:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{AF}. \qquad (2)$$

Нормирование исходных переменных x_i выполняется по формуле

$$x'_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S_i}, \qquad (3)$$

где $\bar{x}$ — среднее арифметическое параметра x; S_i — среднее квадратическое отклонение данной переменной. Элементы матрицы нагрузок $\mathbf{A}$ можно найти на основе преобразования (факторизации) корреляционной матрицы исходных параметров по программе, разработанной для ЦВМ БЭСМ-6 на кафедре Электрических станций, сетей и систем Уральского политехнического института.

После проведения факторизации решается обратная задача — выражение факторов через исходные параметры:

$$\mathbf{F} = \mathbf{Bx}', \qquad (4)$$

где $\mathbf{B}$ — матрица связи.

Здесь основная сложность вызвана тем, что выражение (4) не может быть получено непосредственно из выражения (2), так как при $k<n$ матрица $\mathbf{A}$ не квадратная. Поэтому для решения данной задачи требуется использование регрессионного метода Томсона [Л. 3].

На втором этапе получаем математическое описание искомых экономических характеристик на основе регрессионного анализа:

$$y_t = (L,\ W) = f(\mathbf{F}). \qquad (5)$$

При формировании ЭСМ целесообразно учесть временной лаг, т. е. эффект запаздывания во времени влияния отдельных параметров на прогнозируемые показатели развития электрических сетей. Как известно, такой эффект часто наблюдается в производственно-экономических системах [Л. 5]. Для его выявления были построены взаимные корреляционные функции $R(\tau)$, характеризующие изменение тесноты связи между объемными показателями электросетевого строительства L, W и влияющими параметрами в зависимости от сдвига во времени τ. Анализ корреляционных функций показал, что временной лаг проявляется только в двух параметрах: $N^{ГЭС}_{уст}(\tau=2)$ и $N^{ТЭЦ}_{уст}(\tau=1)$.

Для проведения факторного анализа из указанных выше параметров отобрано десять: $П, H, H_г, N_{уст}$, $N^{ГЭС}_{уст,\tau=2}, N^{ТЭЦ}_{уст,\tau=1}, N_{ст}, N_{бл}, Э_{потр}, P_{max}$. Остальные пять параметров исключены после корреляционного анализа как менее информативные ($n_{15}, n_{100}, Э_{выр}$) или избыточные ($H_с, N^{КЭС}_{уст}$).

Проверка гипотезы о необходимом количестве выделяемых факторов выполнялась по критерию Неймана — Пирсона [Л. 3]:

$$\chi^2 = (N-1)\{\ln|\hat{\mathbf{R}}|/|R_0| + \mathrm{tr}(\mathbf{R}_0\hat{\mathbf{R}}^{-1}) - n\} \qquad (6)$$

при числе степеней свободы

$$\nu = \frac{1}{2}[(n-k)^2 - (n+k)], \qquad (7)$$

где $|\hat{\mathbf{R}}|$ и $|R_0|$ — определители выборочной и вычисленной корреляционных матриц; N — число наблюдений; $\mathrm{tr}(\mathbf{R}_0\hat{R}^{-1})$ — обозначение следа матрицы $\mathbf{R}_0\hat{R}^{-1}$; n — число параметров; k — число выделяемых факторов. Проверка по критерию χ^2 показала, что при уровне значимости $\alpha=0{,}05$ достаточно выделения только трех факторов, охватывающих до 91% суммарной дисперсии переменных (см. рисунок). Столь высокая эффективность факторизации может быть объяснена большими корреляционными связями между исходными параметрами (65% коэффициентов взаимной корреляции параметров имеют значения от 0,5 до 0,99).

Анализ матрицы нагрузок $\mathbf{A}$ показывает, что фактор F_1 отражает главным образом такие показатели, как численность населения, электропотребление, максимальную электрическую нагрузку, суммарную установленную мощность электростанций, которые в совокупности характеризуют энергоэкономический потенциал зоны объединенной энергосистемы. Второй F_2 и третий F_3 факторы имеют наибольшие нагрузки на показатели, определяющие структуру энергосистемы: мощности электростанций разных типов, максимальные мощности агрегатов.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

В целях сопоставимости результатов факторно-регрессионные электросетевые модели были построены на базе той же исходной информации, что и изучавшиеся ранее регрессионные модели [Л. 1]. Для оценки прогностических возможностей моделей исходная статистическая совокупность показателей развития объединенных энергосистем была разбита на две части: обучающую (1960—1970 гг.), на базе которой формировались ЭСМ, и контрольную (1971—1977 гг.), которая использовалась для выявления экстраполяционного эффекта предложенных моделей.

Факторно-регрессионные модели построены по аналогии с регрессионными в форме так называемых Z — моделей [Л. 2], в которых коэффициенты при переменных являются линейными функциями времени:

$$y_t = (L, W) = a_0 + b_0 t + \sum_{i=1}^{k} (a_i + b_i t) F_i = \\ = a_0 + b_0 t + \sum_{i=1}^{k} a_i F_i + \sum_{i=1}^{k} b_i Z_i, \qquad (8)$$

где F_i — факторы; Z_i — новые переменные, полученные путем замены tF_i; a_0, b_0, a_i и b_i — коэффициенты уравнения; t — текущее значение времени. Следует отметить, что учет фактора времени в указанной форме не только позволяет отразить временные тенденции развития электрических сетей, но и способствует повышению статистической значимости результатов моделирования, особенно при ограниченности накопленной исходной информации. В качестве моделируемых электросетевых показателей для объединенных энергосистем приняты суммарные протяженности линий электропередачи и мощности понижающих трансформаторов по ступеням напряжения 110, 220 и 500 кВ: L_{500}, L_{220}, L_{110}, W_{500}, W_{220}, W_{110}.

Наряду с этим была предпринята попытка моделирования некоторых обобщенных характеристик. Для линий электропередачи рассмотрены эквивалентные протяженности:

$$L_{\Sigma}^{\text{экв}} = \alpha_{110} L_{110} + \alpha_{220} L_{220} + \alpha_{500} L_{500}; \qquad (9)$$

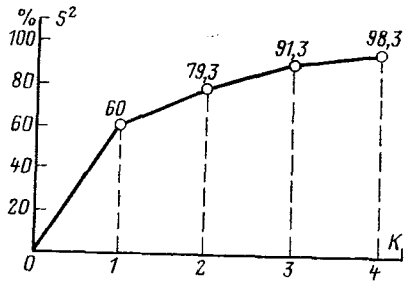
$$L_{110,220}^{\text{экв}} = \alpha_{110} L_{110} + \alpha_{220} L_{220}, \qquad (10)$$

где α — коэффициент приведения, пропорциональный квадрату отношения напряжения данной ступени к базовому (в качестве базового напряжения принято 220 кВ). Указанный показатель с известной степенью условности обеспечивает сопоставимость протяженностей линий разных напряжений по их пропускной способности.

Аппроксимирующие способности полученных факторно-регрессионных ЭСМ оценивались тремя показателями: коэффициентом множественной корреляции R, средней относительной погрешностью $\varepsilon_{ср}$ и среднеквадратическим отклонением S.

Результаты моделирования приводятся в табл. 1. Как видно из табл. 1, переход от ранее изученных регрессионных моделей [Л. 1] к факторно-регрессионным оказался эффективным. Например, для линий электропередачи напряжением 220 кВ погрешности аппроксимации снизились с 9 до 7%, а для трансформаторов 220 кВ — с 13,3 до 9,5%.

Одним из путей дальнейшего снижения погрешностей моделирования при нестабильности изменения электросетевых показателей является переход от факторно-регрессионных к факторно-авторегрессионным моделям, в которых в качестве дополнительной независимой переменной учитывается предшествующее значение самого моделируемого пока-



Зависимость вкладов в суммарную дисперсию переменных S^2 от числа факторов k для электросетевых моделей.

Таблица 1

Моделируемый показатель		R, отн. ед	S, %	$\varepsilon_{ср}$, %				
				энергосистема 1	энергосистема 2	энергосистема 3	энергосистема 4	по четырем энергосистемам
Суммарная протяженность	L_{500}	0,970	43,70	7,70	98,20	102,00	21,00	57,22
	L_{220}	0,986	7,80	5,70	6,99	9,65	6,36	7,17
	L_{110}	0,971	12,30	4,12	6,76	7,15	6,49	6,13
	$L_{\Sigma}^{\text{экв}}$	0,975	27,30	5,77	24,20	30,20	14,50	20,90
	$L_{110,220}^{\text{экв}}$	0,992	5,40	3,31	7,02	6,19	5,15	5,42
Мощность трансформаторов подстанций	W_{500}	0,962	22,90	8,34	11,70	24,20	18,80	15,80
	W_{220}	0,989	8,60	3,00	12,00	11,00	12,00	9,50
	W_{110}	0,988	12,10	11,70	25,70	8,80	7,50	13,40
	$W_{\Sigma}^{\text{экв}}$	0,993	15,40	3,27	10,80	13,40	7,00	8,60
	$W_{110,220}^{\text{экв}}$	0,989	8,80	2,90	6,90	17,20	8,00	8,75

Примечание. Среднеквадратическое отклонение S приведено в процентах от математического ожидания моделируемого показателя.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 2

Моделируемый показатель		R, отн. ед.	S, %	$\varepsilon_{ср}$, %				
				энергосистема 1	энергосистема 2	энергосистема 3	энергосистема 4	по четырем энергосистемам
Суммарная протяженность	L_{500}	0,995	8,80	4,06	10,20	15,70	8,96	9,70
	L_{220}	0,993	5,25	2,80	4,65	6,55	3,27	4,32
	L_{110}	0,977	8,30	5,40	5,58	10,60	9,60	8,03
	$L_{\Sigma}^{экв}$	0,944	15,50	4,10	4,87	7,69	5,79	5,61
	$L_{110,\ 220}^{экв}$	0,996	0,55	3,00	4,07	6,50	5,94	4,94
Мощность трансформаторов подстанций	W_{500}	0,985	19,20	9,49	10,5	21,70	13,43	14,87
	W_{220}	0,993	7,85	2,50	5,70	8,30	3,90	5,10
	W_{110}	0,993	6,28	5,00	5,31	6,38	5,68	5,60
	$W_{\Sigma}^{экв}$	0,981	20,10	6,53	9,95	14,50	6,48	9,37
	$W_{110,\ 220}^{экв}$	0,990	11,50	4,20	5,45	8,30	4,50	5,61

Примечание. Среднеквадратическое отклонение S приведено в процентах от математического ожидания моделируемого показателя.

зателя. При этом ЭСМ приобретает вид:

$$L_t = f(t, F_1, F_2, F_3, tF_1, tF_2, tF_3, L_{t-1}, tL_{t-1}); \quad (11)$$

$$W_t = f(t, F_1, F_2, F_3, tF_1, tF_2, tF_3, W_{t-1}, tW_{t-1}), \quad (12)$$

где L_{t-1} и W_{t-1} — показатели сетей в год $t-1$.

Расчеты показывают, что этот прием позволяет еще более снизить погрешности аппроксимации (см. табл. 2).

Следует отметить, что на данном этапе исследований наиболее эффективные модели получены для сетей 220 и 110 кВ. Моделирование показателей развития сетей 500 кВ дало менее удовлетворительные результаты. По всей вероятности, сети 500 кВ целесообразно моделировать в составе более крупных энергообъединений, чем рассмотренные энергосистемы, так как сети указанного напряжения для большинства систем являются транзитными и, следовательно, слабо связаны с их внутренней структурой. Трудности изучения сетей данного напряжения связаны также и с ограниченностью статистической информации.

Оценка прогностических возможностей наиболее совершенных моделей — факторно-авторегрессионных — выполнена на примере сетей 220 кВ по одному из рассматриваемых энергообъединений. В качестве контрольной выборки использовались данные по развитию электрических сетей одной из энергосистем за период с 1971 по 1977 г.

Результаты сопоставления расчетных и контрольных значений прогнозируемых показателей приводятся в табл. 3. Из табл. 3 видно, что средние погрешности экстраполяции за контрольный период (7 лет) по моделям протяженностей ВЛ и мощностей трансформаторов подстанций составляют соответственно 7 и 10,5%. Следует отметить, что погрешности разработанных электросетевых моделей ниже, чем ожидаемые погрешности прогноза ряда параметров, используемых в моделях в качестве исходных данных. Так, например, погрешность прогноза показателей электропотребления объединенных энергосистем на сроки 7—15 лет оценивается в диапазоне от 10 до 20% [Л. 6].

При использовании для прогноза электросетевых показателей других методов, основанных на

Таблица 3

Годы	Суммарные протяженности линий электропередачи L_{220}, км			Мощности трансформаторов подстанций W_{220}, МВ·А		
	расчетные	контрольные	погрешность, %	расчетные	контрольные	погрешность, %
1971	6792	6657	2,07	10435	10006	4,11
1972	7050	6691	5,10	11029	10396	5,74
1973	7457	6810	8,67	11498	10405	9,50
1974	7461	6925	7,18	13684	11889	13,11
1975	7493	7615	1,63	14960	13264	11,34
1976	7518	8081	7,48	16546	14094	14,82
1977	7671	8810	14,84	17575	15167	13,70
Средняя погрешность, %			6,70			10,33

непосредственной оптимизации конфигурации сетей и геометрическом моделировании, требуется наличие информации по территориальному размещению потребителей и генерирующих мощностей по отдельным узлам энергосистемы. Это сопряжено со значительными объемами расчетов при заметно больших погрешностях исходной информации и поэтому представляется по сравнению с предлагаемым методом менее эффективным при прогнозировании показателей электросетевого строительства на сроки свыше 5 лет.

Выводы. 1. Многофакторные статистические модели позволяют прогнозировать объемные показатели развития электрических сетей объединенных энергосистем в зависимости от совокупности параметров, характеризующих динамику развития энергосистем и определяемых на верхних уровнях иерархии прогнозирования сетей.

2. Сравнительный анализ регрессионных, факторно-регрессионных и факторно-авторегрессионных электросетевых моделей показало, что наиболее эффективными являются факторно-авторегрессионные модели, включающие в число аргументов значения прогнозируемого показателя за предшествующие годы.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мардер Л. И., Мызин А. Л.** Регрессионные и авторегрессионные модели прогнозирования показателей развития электроэнергетических систем. — Электричество, 1975, № 2.
2. **Френкель А. А.** Математические методы анализа динамики и прогнозирования производительности труда. М.: Экономика, 1972.
3. **Лоули Д., Максвелл А.** Факторный анализ как статистический метод. М.: Мир, 1967.
4. **Хармен Г.** Современный факторный анализ. М.: Статистика, 1972.
5. **Розанов Г. В., Френкель А. А.** Проблемы статистического моделирования развития отрасли. — В кн.: Статистический анализ экономических временных рядов и прогнозирование. М.: Наука, 1973.
6. **Электрические станции, сети и системы.** Методы оптимизации управления планированием больших систем энергетики (оптимизация развития и функционирования)/ Под ред. В. А. Веникова, В. И. Идельчика. М.: ВИНИТИ, 1974, т. 7.

[15.8.1978]

УДК 621.315.1

Оценка надежности работы воздушной изоляции подстанций СВН

Доктор техн. наук АЛЕКСАНДРОВ Г. Н., канд. техн. наук ГЕРАСИМОВ Ю. А.

Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина,

доктор Дж. КАРРАРА

Итальянский исследовательский электротехнический центр

Необходимые изоляционные расстояния между электродами соседних фаз подстанций СВН должны выбираться исходя из условия обеспечения заданного уровня надежности работы изоляции при коммутационных перенапряжениях (например, одно перекрытие в 50 лет). Заданный уровень надежности (вероятности перекрытия) изоляционных систем «фаза — фаза — земля» может быть достигнут при различных соотношениях размеров промежутков «фаза — фаза» и «фаза — земля» [Л. 1—3]. Однако при выборе изоляционных систем могут оказаться полезными сведения о распределении разрядов между фазами и между фазами и землей. С этой целью выполнены специальные наблюдения за путями развития разрядов в системах «экран — экран — земля», «провод — провод — портал» и «провод — провод — земля», результаты которых приведены в статье.

Система воздушных промежутков «экран — экран — земля» является эквивалентом изоляционной системы между экранами аппаратов соседних фаз. В качестве макетов экранов использовались сферические решетчатые конструкции диаметром 2 м. Экраны подвешивались на гирляндах изоляторов между несущими порталами так, что имелась возможность изменения высоты электродов над землей и расстояния между ними. Импульсы напряжения различной полярности от каскадов испытательных трансформаторов подводились к электродам шлейфами, как это имеет место на подстанциях.

Макеты проводов ошиновки подстанции подвешивались под порталом и удлинялись расходящимися шлейфами для исключения разрядов с их концов [Л. 3]. К одному из электродов, условно названному вторым, прикладывались импульсы отрицательной полярности постоянной амплитуды. К другому электроду (условно — первому) — импульсы положительной полярности, амплитуда которых изменялась для получения зависимости вероятности перекрытия от воздействующего напряжения. Такие зависимости приведены на рис. 1 для изоляционной системы «экран — экран — земля» с размерами $S=12$ м, $H=13$ м (S — расстояние между экранами, H — высота экранов над землей). Разряды в изоляционных системах развиваются с положительно заряженного (первого) электрода вблизи максимального значения импульса напряжения. В зависимости от соотношений геометрических параметров системы и напряжений на фазах относительная вероятность разрядов, развивающихся между электродами, может изменяться в широких пределах. Относительная вероятность перекрытий по пути «фаза — фаза» может характеризоваться отношением $\varphi=P_S/P$, а по пути «фаза — земля» — отношением P_H/P, где P_S — вероятность междуфазовых перекрытий, P_H — вероятность перекрытий на землю, P — суммарная вероятность перекрытия изоляционной системы ($P=P_S+P_H$). Данные экспериментальных исследований изоляционных систем приведены в таблице, откуда видно, что отношение P_S/P изменяется при изменении соотношения напряжений на электродах. Так, на рис. 1 приведены зависимости вероятностей P_S и P_H от напряжения на первом электроде для двух значений напряжения на втором электроде. Как видно из рис. 1, соотношение вероятностей P_S и P_H в указанных двух случаях различаются. Если при $U_2=-1{,}18$ МВ вероятности P_S и P_H близки ($P_S/P\approx0{,}5$), то при $U_2=-1{,}86$ МВ вероятность P_S больше P_H ($P_S/P\approx0{,}75$). Таким образом, частота междуфазовых перекрытий зависит от напряжения отрицательной полярности на втором электроде. Примеры таких зависимостей приведены на рис. 2.

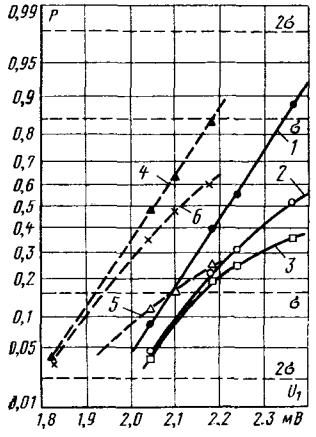


Рис. 1. Зависимости вероятностей перекрытия P (*1*, *4*), P_H (*2*, *5*) и P_S (*3*, *6*) изоляционной системы «экран — экран — земля» ($S=12$ м, $H=13$ м) от амплитуды напряжения на первой фазе.
1—3 — $U_2=-1{,}18$ МВ, *4—6* — $U_2=-1{,}86$ МВ.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

При росте напряжения U_2 увеличивается степень влияния второго электрода на напряженность поля вблизи первого электрода [Л.4] и все большая часть разрядов, развиваясь с первого электрода, заканчивается на втором. На направление развития разряда оказывает существенное влияние расстояние между электродами. Уменьшение изоляционного расстояния между фазами приводит к увеличению числа разрядов между ними, что также является следствием роста влияния соседнего электрода. При удалении электродов от земли и заземленных объектов относительная вероятность междуфазовых перекрытий увеличивается (рис. 2). Приведенные выше зависимости относительной вероятности разрядов между электродами от параметров U_2, S и H характерны для всех исследованных изоляционных систем.

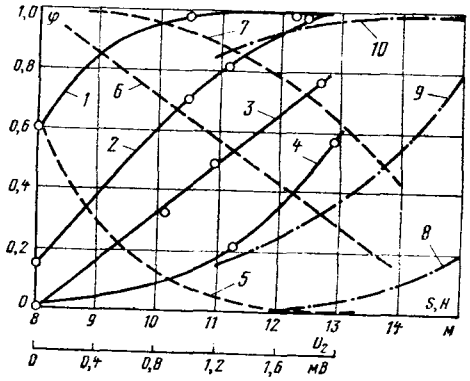


Рис. 2. Зависимости частости междуфазных перекрытий φ в системе «экран — экран — земля» (*1—7*) и «провод — провод — земля» (*8—10*) от напряжения U_2 (*1—4*), расстояния S (*5—7*) и высоты H (*8—10*).

1 — S=8 м; *2* — 10 м; *3* — 12 м; *4* — 14 м; *5* — U_2=0; *6* — U_2= —1 МВ; *7* — U_2= —1,8 МВ.

1—7 — H=13 м; *8* — U_2=0; *9* — U_2= —1,12 МВ; *10* — U_2= —1,75 МВ; *8* — *10* — S=10 м.

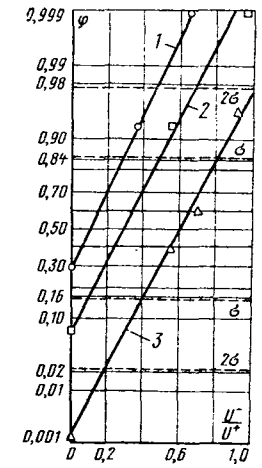


Рис. 3. Зависимости частости междуфазовых перекрытий в системе «экран — экран — земля» от соотношения напряжений на фазах U^-/U^+ при H=15 м.

1 — S=10 м; *2* — 12 м; *3* — 14 м.

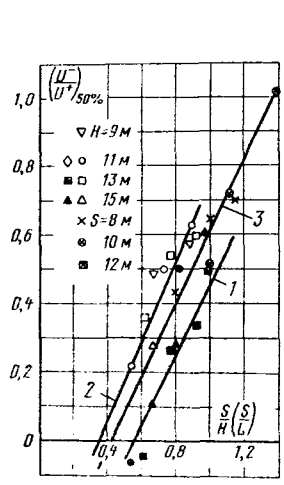


Рис. 4. Зависимости отношения напряжений на фазах при 50%-ной вероятности разрядов от отношения геометрических размеров систем.

1 — «экран — экран — земля»; *2* — «провод — провод — земля»; *3* — «провод — провод — портал».

Наличие многих переменных, от которых зависит распределение разрядов в изоляционных системах, затрудняет анализ. Поэтому исследовалась возможность сокращения числа переменных.

При постоянных значениях S и H экспериментальные значения φ были построены в зависимости от отношения напряжений на фазах U^-/U^+. Пример такого построения для изоляционной системы «экран — экран — земля» при H=15 м и разных значениях S приведен на рис. 3. Эти зависимости не противоречат нормальному закону распределения случайной величины, что подтверждается данными для систем различной конфигурации при разных размерах промежутков. Из зависимостей $\varphi = f(U^-/U^+)$ были определены значения отношения U^-/U^+, соответствующие 50%-ной частости междуфазовых перекрытий вне зависимости от вероятности разряда в системе. Эти значения дальше обозначаются $(U^-/U^+)_{0,5}$. По крутизне кривых рис. 3 и аналогичных кривых для других значений S, H или L и систем разных конфигураций определены значения стандарта $\sigma_\varphi = (U^-/U^+)_{0,5} - (U^-/U^+)_{0,16}$, где $(U^-/U^+)_{0,16}$ соответствует 16%-ной частости междуфазовых перекрытий. Интересно отметить, что для систем одной конфигурации значения σ_φ изменяются незначительно при изменении соотношений геометрических параметров. Обработка всех данных наблюдений показала, что для изоляционных систем «экран — экран — земля» и «провод — провод — земля» σ_φ изменяется в пределах 0,13—0,18, а для изоляционной системы «провод—провод — портал» — (0,16—0,22). При этом в указанных диапазонах изменения σ_φ не обнаружено его зависимости от геометрических размеров систем или их соотношения. Поэтому для дальнейших рассуждений можно принять постоянные значения $\sigma_\varphi \approx 0{,}16$ для первых двух из исследованных систем и $\sigma_\varphi \approx 0{,}19$ для третьей системы.

Все значения $(U^-/U^+)_{0,5}$, полученные из рис. 3 и аналогичных ему для систем воздушных промежутков различной конфигурации, приведены на рис. 4 в виде зависимостей отношений $(U^-/U^+)_{0,5}$ от отношения геометрических размеров S/H или S/L. Следует признать, что наблюдается большой разброс опытных точек, который может быть объяснен ограниченным числом испытаний, однако ход зависимостей $(U^-/U^+)_{0,5} = f(S/H)$ и $(U^-/U^+)_{0,5} = f(S/L)$ вырисовывается достаточно явно. Полученные закономерности указывают на то, что независимо от абсолютных размеров изоляционных систем распределение разрядов практически постоянно при постоянных отношениях S/H и U^-/U^+.

Различное местоположение зависимостей на рис. 4 объясняется различием степени влияния экранов и проводов ошиновки, а также близости земли и заземленного портала на развитие разряда в изоляционных системах.

По экспериментальным данным были подобраны следующие эмпирические выражения для зависимостей, изображенных на рис. 4:

система «экран — экран — земля»

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$(U^-/U^+)_{0,5}=S/H-0,55; \quad (1)$$

система «провод — провод — земля»

$$(U^-/U^+)_{0,5}=1,13(S/H-0,35); \quad (2)$$

система «провод — провод — портал»

$$(U^-/U^+)_{0,5}=1,07(S/L-0,43). \quad (3)$$

При известной величине σ_φ эти формулы могут быть обобщены на случай произвольного распределения разрядов между электродами и на землю. Действительно, отношение $(U^-/U^+)_\varphi$, соответствующее произвольному значению φ

$$(U^-/U^+)_\varphi=(U^-/U^+)_{0,5}+k\sigma_\varphi, \quad (4)$$

где k — разность $(U^-/U^+)_\varphi-(U^-/U^+)_{0,5}$, отнесенная к величине σ_φ.

Подставляя в формулу (4) значения $(U^-/U^+)_{0,5}$ из выражений (1)—(3), получим для систем различной конфигурации:

«экран — экран — земля»

$$(U^-/U^+)_\varphi=S/H-0,55+k\sigma_\varphi; \quad (5)$$

«провод — провод — земля»

$$(U^-/U^+)_\varphi=1,13(S/H-0,35)+k\sigma_\varphi; \quad (6)$$

«провод — провод — портал»

$$(U^-/U^+)_\varphi=1,07(S/L-0,43)+k\sigma_\varphi. \quad (7)$$

Выражения (5)—(7) позволяют определить необходимые отношения U^-/U^+ для получения заданной величины φ при различных значениях S/H (например, при $\varphi=0,16$, $k=-1$), а также необходимые значения отношений изоляционных расстояний S/H (или S/L) при заданном распределении разрядов между фазами и на землю и заданном отношении напряжений на фазах:

система «экран — экран — земля»

$$(S/H)_\varphi=0,55+(U^-/U^+)_\varphi-k\sigma_\varphi; \quad (8)$$

система «провод — провод — земля»

$$(S/H)_\varphi=0,35+0,88(U^-/U^+)_\varphi-0,88k\sigma_\varphi; \quad (9)$$

система «провод — провод — портал»

Результаты экспериментальных исследований изоляционных систем

„экран—экран—земля"					„провод—провод—земля"					„провод—провод—портал"				
H, м	S, м	U_2^-, МВ	$U_{0,5\cdot1}^+$, МВ	φ	H, м	S, м	U_2^-, МВ	$U_{0,5\cdot1}^+$, МВ	φ	S, м	L, м	U_2^-, МВ	$U_{0,5\cdot1}^+$, МВ	φ
11	6	0 —1,0 —1,58	2,10 1,75 1,40	0,62 1,0 1,0	9	6	0 —0,9	1,99 1,81	0,05 0,5	10	7	0 —0,84 —1,78	2,02 2 1,89	0 0 0,09
	8	0 —1,0 —1,67	2,27 2,03 1,71	0,04 0,47 0,94		8	0 —0,9 —1,6	2,12 2,02 1,83	0 0,21 0,92		9	0 —0,90 —1,78	2,29 2,19 1,99	0,05 0,21 0,68
13	8	0 —1,0 —1,7	2,28 2,06 1,74	0,6 1,0 1,0	11	6	0 —1,0	2,06 1,79	0,13 0,96		10	0 —1,26 —1,78	2,35 2,17 2,04	0,05 0,63 0,88
	10	0 —1,0 —1,26 —1,78	2,32 2,14 2,10 1,92	0,15 0,7 0,81 1,0		8	0 —1,0 —1,71	2,24 2,05 1,85	0,03 0,33 1,0	8	7	0 —1,02 —1,60	1,95 1,83 1,74	0 0,2 0,96
	12	0 —0,85 —1,18 —1,86	2,33 2,26 2,22 2,05	0 0,32 0,49 0,76		10	0 —1,0 —1,71	2,3 2,2 2,07	0 0,2 0,87		8	0 —0,84 —1,15 —1,66	2,12 2,0 1,98 1,86	0 0,04 0,41 0,8
	14	0 —1,3 —1,96	2,35 2,28 2,20	0 0,21 0,57	13	8	0 —1,12 —1,82	2,28 2,06 1,76	0,09 0,75 1		10	0 —1,0 —1,76	2,28 2,03 1,78	0,15 0,57 0,96
15	10	0 —0,84 —1,38 —1,96	2,44 2,25 2,08 1,86	0,34 0,94 1,0 1,0		10	0 —1,12 —1,74	2,46 2,32 2,12	0,03 0,37 0,97	12	12	0 —1,1 —1,8	2,6 2,41 2,26	0 0,51 0,8
	12	0 —1,22 —1,96	2,45 2,20 2	0,07 0,5 0,96		12	—1,88	2,3	0,9					
	14	0 —1,28 —1,6 —2,02	2,46 2,33 2,28 2,20	0 0,39 0,6 0,95	15	10	0 —1,12 —1,8	2,45 2,23 2,08	0,19 0,81 0,98					

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

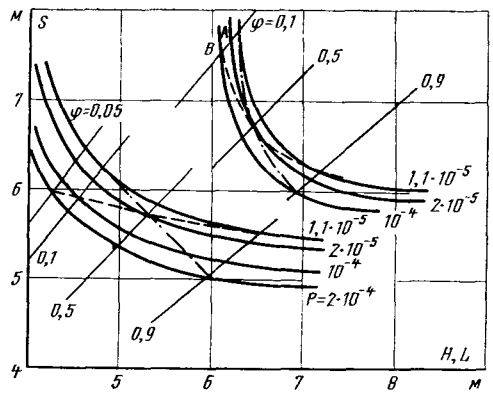


Рис. 5. Зависимости необходимого изоляционного расстояния между фазами от высоты электродов над землей в системе «экран — экран — земля» и от расстояния до портала в системе «провод — провод — портал» при заданных значениях вероятности перекрытия систем и частости междуфазовых перекрытий.

$$(S/L)_\varphi = 0{,}43 + 0{,}93\,(U^-/U^+)_\varphi - 0{,}93k\sigma_\varphi. \qquad (10)$$

Преобразовав выражения (5)—(7), можно определить частости междуфазовых перекрытий при известных отношениях S/H (или S/L) и U^-/U^+. Определив для каждой из изоляционных систем величину k:

система «экран — экран — земля»

$$k = 1/\sigma_\varphi\,[0{,}55 + (U^-/U^+)_\varphi - (S/H)_\varphi]; \qquad (11)$$

система «провод — провод — земля»

$$k = 1{,}13/\sigma_\varphi\,[0{,}35 + (U^-/U^+)_\varphi - (S/H)_\varphi]; \qquad (12)$$

система «провод — провод — портал»

$$k = 1{,}07/\sigma_\varphi\,[0{,}43 + (U^-/U^+)_\varphi - (S/L)_\varphi], \qquad (13)$$

можно получить по таблицам функции нормального распределения случайных величин значение частости φ.

Формулы (8)—(10) использованы для построения зависимостей необходимых отношений размеров S и H от отношений U^-/U^+ при разных значениях частости междуфазовых перекрытий. Такие зависимости были построены для всех рассматриваемых изоляционных систем. Они представляют собой прямые линии, параллельные друг другу, и показывают, что при заданном отношении U^-/U^+ увеличение отношения S/H приводит к уменьшению частости разрядов между фазами. Наличие таких прямолинейных зависимостей указывает на однозначность соотношения числа разрядов по путям «фаза — фаза» и «фаза — земля» при заданных соотношениях напряжений на фазах и размеров систем.

Полученные результаты позволили сформулировать критерии подобия изоляционных систем типа «фаза — фаза — земля», что чрезвычайно важно для их анализа и практического использования. Действительно, при сохранении неизменными отношений U^-/U^+ и S/H (S/L) независимо от абсолютных значений напряжений и расстояний распределение разрядов по путям «фаза — фаза» и «фаза — земля» сохраняется неизменным. Отсюда можно сделать вывод, что условия развития разряда в системах «фаза — фаза — земля» подобны при неизменных значениях U^-/U^+ и S/H (или S/L), т. е. при геометрическом подобии систем и при неизменном отношении напряжений. Это справедливо во всяком случае для систем с изоляционными расстояниями 6—15 м.

Таким образом, критериями подобия изоляционных систем «фаза — фаза — земля» являются отношения S/H (или S/L)=const, U^-/U^+=const.

Выбор необходимых изоляционных расстояний на подстанциях сверхвысокого напряжения следует производить исходя из условия обеспечения заданного уровня надежности работы изоляции. При этом требуется располагать данными об электрической прочности изоляционных систем и о перенапряжениях, воздействующих на фазы систем. Данные об электрической прочности изоляционных систем «экран — экран — земля» и «провод — провод — портал» получены в результате экспериментальных исследований, а данные о перенапряжениях, одновременно воздействующих на фазы ошиновки подстанции 750 кВ, получены в результате расчета на ЭВМ применительно к схеме электропередачи Конаково — Ленинград.

Распределение максимальных значений перенапряжений на первой фазе и соответствующих им мгновенных значений напряжений на второй фазе U_2 могут быть аппроксимированы нормальными распределениями случайных величин.

Обозначим их плотности $f(U_{m,1})$ и $f(U_2)$ или в относительных единицах $f(K_{п,1})$ и $f(K_2)$, где $K_{п,1} = \frac{U_{m,1}}{U_{фm}}$, $K_2 = U_2/U_{фm}$, $U_{фm}$ — амплитуда наибольшего фазного рабочего напряжения. Параметры функций распределения кратностей на первой и второй фазах соответственно равны: $\bar{K}_{п,1}=1{,}54$, $\sigma_{п,1}=0{,}196$; $\bar{K}_2=-1{,}06$, $\sigma_2=0{,}4$.

Вероятность перекрытия двухфазной изоляционной системы при одновременном воздействии на фазы двух случайных величин напряжений [Л. 2]:

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} f(K_2)\,F_п\left[\frac{\bar{K}_{п,1} - K_{0,5.1}(K_2)}{\sqrt{\sigma^2_{п,1} + \sigma^2_1\,(K_2)}}\right]dK_2, \qquad (14)$$

где $K_{0,5.1}$ и σ_1 — характеристики электрической прочности изоляции, выраженные в относительных единицах (по отношению к наибольшему фазному напряжению электропередачи).

Допустимую вероятность перекрытия изоляционной системы определим из условия обеспечения одного перекрытия изоляции подстанции в течение заданного времени (например, 50 лет). С учетом большого числа параллельных ослабленных мест на подстанции ($m \approx 100$) и расчетного числа опасных коммутаций в год ($n_п=10$), значение $P^* = \frac{1}{50}\cdot\frac{1}{10}\cdot\frac{1}{100} = 2\cdot10^{-5}$.

По данным статистического анализа кратностей воздействующих перенапряжений и результатам исследований электрической прочности систем воздушных промежутков по формуле (14) были полу-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

чены изоляционные расстояния, которые обеспечивают то или иное значение вероятности перекрытия, причем заданное значение вероятности перекрытия может быть обеспечено при различных соотношениях геометрических параметров систем. В результате расчетов построены зависимости необходимых расстояний между электродами S от высоты их над землей в системе «экран — экран — земля» и от расстояния до портала в системе «провод — провод — портал». Эти зависимости приведены на рис. 5. На этом же рисунке приведены зависимости $S=f(H)$ и $S=f(L)$ для других значений вероятности перекрытия изоляционных систем. Как видно из рис. 5, для систем различной конфигурации и разных значений вероятности их перекрытия зависимости необходимых расстояний имеют одинаковый характер и указывают на возможность варьирования изоляционных расстояний в определенных пределах. При этом по всей кривой сохраняется постоянная вероятность перекрытия изоляционной системы в целом. Однако при изменении соотношений изоляционных расстояний изменяется соотношение числа разрядов по путям «фаза — фаза» и «фаза — земля». На рис. 5 нанесены прямые, характеризующие соотношения изоляционных расстояний, удовлетворяющих заданному распределению разрядов. Эти зависимости построены по формулам (8)—(10) при отношении $U^-/U^+=0{,}69$, соответствующим наиболее вероятному соотношению напряжений на фазах, полученному в результате статистического анализа данных перенапряжений. Таким образом, по зависимостям, приведенным на рис. 5, можно выбрать изоляционные расстояния, с одной стороны, по условию обеспечения заданного уровня надежности работы изоляционной системы, и, с другой стороны, исходя из заданного распределения разрядов. Так, точка A на рис. 5 ($H=6{,}2$ м, $S=7{,}7$ м) соответствует вероятности разряда в системе «экран — экран — земля», равной 2×10^{-5} при частости разрядов между электродами на порядок меньшей частости разрядов на землю. По данным рис. 5 и аналогичным данным для разных значений вероятности перекрытия и распределения разрядов могут быть получены зависимости необходимых расстояний $S=f(H)$ и $S=f(L)$, для которых будет соблюдаться условие постоянства вероятности перекрытия промежутка между фазами или на землю.

Вероятность перекрытия отдельных промежутков «фаза — фаза» и «фаза — земля»

$$P_S=P\cdot\varphi;\quad P_H=P(1-\varphi). \qquad (15)$$

Так, например, точка B на рис. 5 соответствует общей вероятности перекрытия изоляционной системы «экран — экран — земля» $P=10^{-4}$ и частости междуфазовых перекрытий $\varphi=0{,}1$. При этом вероятности перекрытия по путям «фаза — фаза» и «фаза — земля», найденные по формулам (15), соответственно равны:

$$P_S=10^{-5},\quad P_H=9\times10^{-5}.$$

Аналогичным образом были определены вероятности перекрытия отдельных промежутков, составляющих систему с различными геометрическими размерами, что позволило построить зависимости минимально допустимых изоляционных расстояний между электродами от высоты их над землей или расстояния до портала при постоянном заданном значении вероятности перекрытия междуфазового промежутка. Примеры таких зависимостей при $P_S=10^{-5}$ для систем «экран — экран — земля» и «провод — провод — портал» нанесены штриховыми линиями на рис. 5. Аналогичным образом могут быть получены зависимости при постоянных значениях вероятности перекрытия промежутка «электрод — земля», соответствующие вероятности $P_H=10^{-5}$ в системе «экран — экран — земля» и $P_L=10^{-5}$ в системе «провод — провод — портал».

Вывод. Отношения напряжений на фазах и отношения длин промежутков между фазами и до земли являются критериями подобия изоляционных систем, которые позволяют обобщить характеристики электрической прочности и распределения разрядов в таких системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Электрическая** прочность междуфазовых воздушных промежутков на подстанциях сверхвысокого напряжения при коммутационных перенапряжениях/ Александров Г. Н., Герасимов Ю. А., Редков В. П., Лысков Ю. И. — Электричество, № 10, 1972, с. 7—12.

2. **Александров Г. Н., Герасимов Ю. А.** Электрическая прочность трехфазных изоляционных систем электропередач. — Электричество, 1976, № 6, с. 28—31.

3. **Александров Г. Н., Герасимов Ю. А.** Электрическая прочность трехфазных изоляционных систем подстанций при коммутационных перенапряжениях. — Электричество, 1979, № 1.

4. **Александров Г. Н., Подпоркин Г. В.** Методика оценки электрической прочности многоэлектродных изоляционных систем по данным испытаний простейших промежутков. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1976, № 4.

[10.11.1978]

УДК 621.314.223.015.38.001.24

Влияние характеристики вентильного разрядника на ограничение перенапряжений в автотрансформаторах

ДЖУВАРЛЫ Ч. М., БЕЙДУЛЛАЕВ М. А., МУФИД-ЗАДЕ Н. А.

Азербайджанский научно-исследовательский институт энергетики

Грозовая волна при отсутствии среза ее на линии или на подстанции в любой точке подстанции может быть заменена стандартной волной. При срабатывании вентильного разрядника форма волны на входе трансформатора и автотрансформатора существенно изменяется.

Определение формы грозовых перенапряжений на подстанции с учетом ее реальной схемы имеет

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

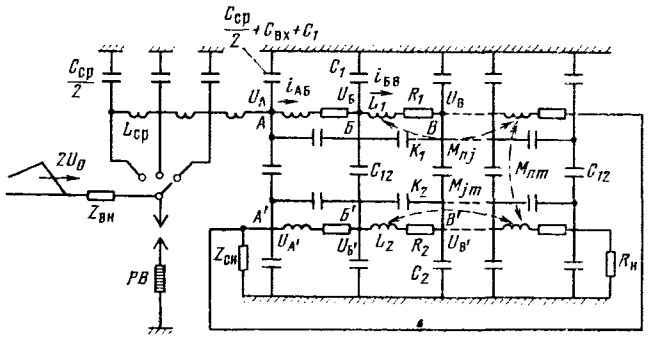


Рис. 1.

важное значение для выбора импульсного испытательного напряжения и уточнения уровня допустимых перенапряжений на изоляции оборудования.

С ростом рабочего напряжения сетей по технико-экономическим соображениям возникает необходимость ограничения запаса изоляции. Выбранное импульсное испытательное напряжение при этом должно согласовываться с защитными характеристиками вентильных разрядников. Обоснованное согласование импульсного испытательного напряжения и характеристик разрядников позволит обеспечить высокую надежность грозозащиты трансформаторов и автотрансформаторов.

Обычно при установленном импульсном испытательном напряжении трансформаторов (автотрансформаторов) выбирается допустимое остающееся напряжение на разряднике, которому соответствует расчетный импульсный ток $I_р$. Этот ток для разрядников 110—220 кВ определяется по условиям грозозащиты тупиковой подстанции, защищенной одним комплектом вентильных разрядников:

$$I_р = \frac{2U_0 - U_{ост}}{Z_л},$$

где U_0 — амплитуда воздействующей волны; $U_{ост}$ — остающееся напряжение на вентильном разряднике; $Z_л$ — волновое сопротивление линии электропередачи. Для разрядников 110—220 кВ $I_р$= =5 кА.

При срабатывании разрядника ток, протекающий через него, практически мгновенно приобретает значение, соответствующее пробивному напряжению по его вольт-амперной характеристике [Л. 1]. В зависимости от значения пробивного напряжения этот ток может значительно превышать $I_р$.

В статье рассматриваются перенапряжения, возникающие в автотрансформаторе, заземленном через резистор. Расчетная схема, описание которой приведено в приложении, показана на рис. 1. Подобный расчет ранее осуществлен для более простой схемы [Л. 2].

Аналитический расчет перенапряжений как на входе, так и внутри автотрансформатора для рассматриваемой схемы с учетом типов разрядников, а также их срабатываний представляет значительные трудности, а на анализаторе грозозащиты подстанции такой расчет может быть осуществлен только для входа автотрансформатора, причем со значительными погрешностями. Поэтому для получения достоверных данных расчет проведен численным методом с использованием ЦВМ.

Амплитуда принятой стандартной волны соответствует уровню изоляции ВЛ 220 кВ на металлических опорах.

Согласно расчетной схеме выражение для напряжения на входе автотрансформатора

$$u_{вх}(t) = u_{возд}(t) - Z_{ВН} \exp\left(\frac{\ln U_р/A}{\alpha}\right) - Z_{ВН} M^{-1}\left[\int_0^t (\delta U - IR)\,dt - L_{ср}\int_0^t \frac{\partial}{\partial t}(\delta U - IR)\,dt\right], \quad (1)$$

где $u_{возд}(t)$ — воздействующая волна; $U_р = AI_р^{\alpha}$ — напряжение на разряднике после его срабатывания при показателе вентильности α (в зависимости от типа разрядника α=0,13÷0,15); $M^{-1}\int(\delta U - IR)\,dt$ — ток через автотрансформатор с учетом входной емкости подстанции.

В качестве вентильного разрядника рассматривались РВС-220, РВМГ-220 и РВРД-220. Расстояние точки присоединения разрядника от автотрансформатора $l_р$ менялось в пределах от 30 до 120 м. Исследование проводилось также для случая, когда вентильный разрядник не срабатывает.

Результаты расчета показывают, что замена автотрансформатора только входной емкостью дает завышенное значение $u_{вх}(t)$ по сравнению с полученным при использовании реальной схемы замещения, причем разница в этих значениях существенна.

Значительное влияние на максимальное значение напряжения $u_{вх}(t)$ оказывает пробивное напряжение $U_{проб}$ разрядников. В пределах изменения предразрядного времени от 1,5 до 20 мкс $U_{проб}$ считается постоянным, хотя с повышением рабочего напряжения разрядников зависимость $U_{проб}=f(t)$ усложняется.

Как показывают расчеты, напряжения на входе обмотки высокого напряжения автотрансформатора после срабатывания разрядника имеют колебательный характер.

В табл. 1 для различных значений $U_{проб}$ приведены рассчитанные значения трех первых максимумов напряжения на входе автотрансформатора U_1, U_2 и U_3, соответствующие им времена t_1, t_2 и t_3, период колебаний T и амплитуда тока в разряднике $I_р$. Расчет проведен для $R_н$=7 Ом [Л. 3], $l_р$= =120 м.

Таблица 1

$U_{проб}$, кВ	U_1, кВ	U_2, кВ	U_3, кВ	$U_{СН}$, кВ	t_1, мкс	t_2, мкс	t_3, мкс	T, мкс	$I_р$, кА
445	1120	900	760	110	3,0	9,0	15,0	6,0	6,0
530	1060	870	750	105	3,0	9,0	15,0	6,0	5,6
	1127	963	841		2,0	8,0	13,0	5,2	5,6
650	800	710	660	110	1,9	8,0	14,0	6,0	4,0
700	840	960	800	116	2,0	7,0	13,0	6,0	6,5

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Для $U_{проб}$=530 кВ в табл. 1 все значения рассчитаны как для упрощенной схемы (величины в знаменателе), так и для реальной схемы замещения автотрансформатора (величины в числителе). Тот факт, что для реальной схемы замещения напряжения на входе автотрансформатора имеют меньшие, а соответствующие им времена бо́льшие значения, должен быть учтен при уточнении формы кривой допустимого напряжения.

Существенное влияние на напряжение на входе автотрансформатора оказывает пробивное напряжение. Существует оптимальное значение этого напряжения, отклонение от которого в ту или другую сторону приводит к увеличению как напряжения на входе автотрансформатора, так и тока в разряднике. Для выяснения причины возникновения такого оптимума рассмотрим вольт-амперную характеристику разрядника и внешнюю характеристику для цепи, показанной на рис. 2. Минимальное напряжение на входе автотрансформатора с волновым сопротивлением $Z_{тр}$ [Л. 3] соответствует точке пересечения этих характеристик, для которой $U_{проб}$= =650 кВ (рис. 2). При этом значении пробивного напряжения зависимость его остаточного напряжения от времени практически имеет характер прямой, проходящей параллельно оси абсцисс (рис. 3, кривая *1*). При отклонении пробивного напряжения от 650 кВ как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения, остаточные напряжения претерпевают значительные изменения (рис. 3, кривые *2—4*, кривая *2*—$U_{проб}$ = 700 кВ, кривая *3*—$U_{проб}$=530 кВ, кривая *4*—$U_{проб}$=445 кВ). Колебаниям остаточных напряжений соответствуют колебания сопротивления разрядника после его срабатывания (рис. 3, кривые *5—8*). С течением времени сопротивление разрядника плавно растет, при этом остаточное напряжение на разряднике перед гашением дуги становится меньше его пробивного напряжения.

Таким образом, точка пересечения характеристик, соответствующая напряжению 650 кВ, является квазиустойчивой точкой, отклонение от которой приводит к значительным колебаниям остаточного напряжения разрядника. Эти результаты показывают, что принятое в настоящее время разрядное напряжение в 530 кВ не обеспечивает получения минимального напряжения на входе автотрансформатора. Оптимальное пробивное напряжение разрядника должно быть установлено исходя из условия обеспечения минимального напряжения на входе автотрансформатора.

Следует также отметить, что когда пробивное напряжение разрядника превышает его оптимальное значение, максимум напряжения на входе автотрансформатора наступает во втором периоде колебаний, что было обнаружено ранее экспериментально [Л. 4]. Так, наши расчеты показывают, что при $U_{проб}$=700 кВ U_1=840 кВ, а U_2=960 кВ. Это обстоятельство должно быть учтено при уточнении формы кривой допустимого напряжения.

Представляет интерес анализ влияния пробивного напряжения разрядника на перенапряжения на входе автотрансформатора при волнах, отличных от стандартных (см. табл. 2). Расчеты для косоугольной волны с фронтом в 4, 5, 10 мкс и бесконечной длины показывают, что по мере удлинения фронта приходящей волны точка пересечения характеристик, соответствующая оптимальному значению пробивного напряжения, несколько перемещается вниз от значения 650 кВ, установленного для стандартной волны. Однако по мере удлинения фронта напряжение, воздействующее на автотрансформатор, при оптимальном значении $U_{проб}$ уменьшается.

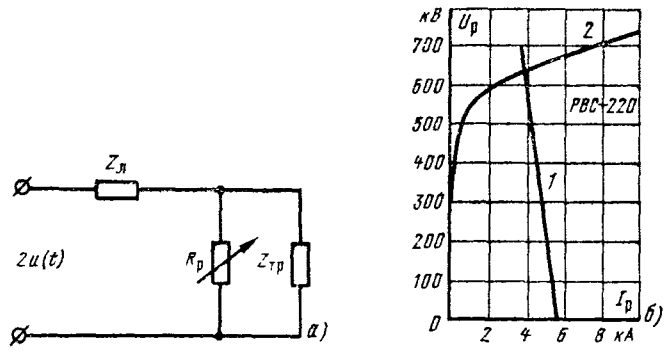


Рис. 2.

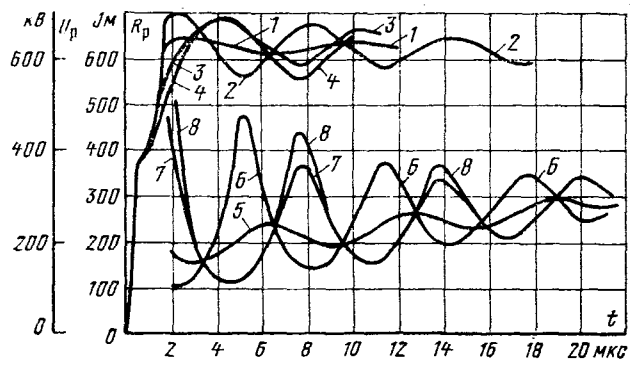


Рис. 3.

Расчет показывает, что все установленное значение качественно остается в силе и для волны 4/40. Уменьшение оптимального значения пробивного напряжения при больших значениях фронта волны следует объяснить уменьшением волнового сопротивления автотрансформатора. Таким образом, наиболее тяжелым для автотрансформаторов являются воздействия стандартной волны.

Сравнение расчетных данных, приведенных в табл. 2 для волн 4/∞ и 4/40, показывает, что длина приходящей волны мало влияет на перенапряжения в автотрансформаторе при срабатывании разрядника.

Если пробивное напряжение разрядника превышает его оптимальное значение, наступление максимума напряжения на входе автотрансформатора во втором периоде имеет место и при указанных формах волн (см. табл. 2). Это явление также необходимо учитывать при уточнении кривой допустимого напряжения для главной изоляции автотрансформаторов.

Представляет интерес выявление влияния типа разрядника и его удаленности от автотрансформатора на $u_{вх}(t)$. Результаты расчета представлены в табл. 3. Напряжение на входе автотрансформато-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 2

№ п/п	$U_{проб}$, кВ	Параметры волн перенапряжений: Косоугольная волна бесконечной длины, $\tau_ф$=4 мкс: U_1, кВ	U_2, кВ	U_3, кВ	$I_р$, кА	$\tau_ф$=5 мкс: U_1, кВ	U_2, кВ	U_3, кВ	$I_р$, кА	$\tau_ф$=10 мкс: U_1, кВ	U_2, кВ	U_3, кВ	$I_р$, кА	Волна 4/40 мкс: U_1, кВ	U_2, кВ	U_3, кВ	$I_р$, кА	$R_н$, Ом
1	445	900	800	760	5,3	840	780	720	4,3	690	700	690	4,10	940	800	700	4,7	7
2	530	860	780	740	4,9	800	740	720	4,60	640	680	670	3,94	880	800	700	4,5	7
3	650	580	830	770	4,8	580	880	800	4,95	620	900	800	5,14	540	820	780	4,8	7
4	700	620	1090	940	6,5	620	1120	960	6,5	680	1100	920	6,36	720	1040	940	6,2	7

Таблица 3

Тип разрядников	$l_р$, м	U_1, кВ	U_2, кВ	U_3, кВ	t_1, мкс	t_2, мкс	t_3, мкс	T, мкс	$U_{СН}$, кВ	$I_р$, кА	$R_н$, Ом
РВС-220	120	1060	870	750	3,0	9,0	15,0	6,0	105	5,6	7
РВМГ-220	120	830	705	610	3,0	9,0	15,0	6,0	90	5,6	7
РВРД-220	120	580	515	490	3,5	9,5	16,0	6,0	60	5,0	7
РВРД-220	60	500	460	440	2,0	6,5	10,5	4,5	94	4,8	7
РВРД-220	30	460	440	420	1,8	4,5	7,5	2,7	85	4,5	7

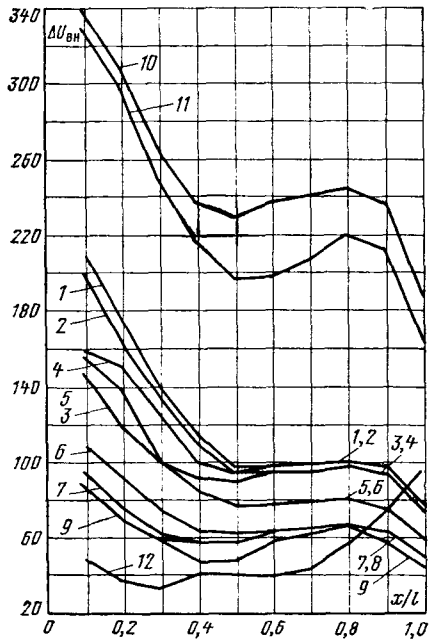


Рис. 4.

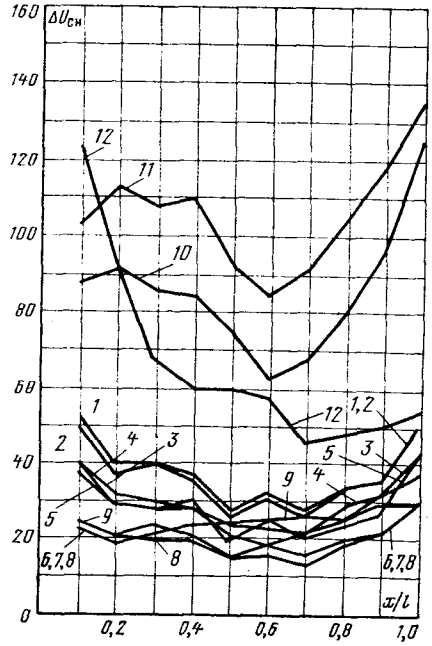


Рис. 5.

ра при разряднике типа РВРД почти в 2 раза меньше, чем при разряднике типа РВС, что должно быть учтено при установлении уровня главной изоляции автотрансформаторов. Изменение $l_р$ в широких пределах приводит к относительно небольшим изменениям напряжения на входе автотрансформатора. Для разрядников типа РВРД имеется возможность варьирования его удаленности в широких пределах, что также является его преимуществом. Изменение сопротивления резистора в пределах 7—750 Ом практически не влияет на напряжение на входе автотрансформатора. На напряжение на входе автотрансформатора также не влияет наличие линии на стороне среднего напряжения.

Пробивное напряжение разрядника оказывает значительное влияние на градиенты в автотрансформаторе, в особенности на начальном участке обмотки. Это влияние, а также зависимость градиентов от $l_р$ иллюстрируют кривые рис. 4 и 5. Соответствующие параметры, приведены в табл. 4. Для сравнения на рисунках 4 и 5 приведены градиенты при отсутствии разрядника (кривые *10* и *11*).

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таблица 4

Тип разрядника	$U_{проб}$, кВ	$l_р$, м	$R_н$, Ом	$Z_{СН}$, Ом	$Z_{ВН}$, Ом
РВС-220	445	120	7	400	400
РВС 220	530	120	7	400	400
РВС-220	650	120	7	400	400
РВС-220	700	120	7	400	400
РВМГ-220	445	120	7	400	400
РВРД-220	400	120	7—750	400	400
РВРД-220	400	30	7	400	400
РВРД-220	400	60	7	400	400
РВРД-220	400	120	7	линия отключена	400
Без разрядников	нет	нет	7	400	400
Без разрядников	нет	нет	7	линия отключена	400
РВМГ-110	215	120	7	400	400

Роль разрядника в снижении градиентов, в особенности на начальном участке обмотки автотрансформатора, значительна. Минимальные градиенты в обмотке автотрансформатора при данном типе разрядника так же, как и минимальные перенапряжения, возникают при оптимальном значении пробивного напряжения. Так, для разрядника РВС-220 кривая градиента при $U_{проб}$=650 кВ (кривая *3*) расположена ниже остальных кривых (кривые *1*, *2* и *4*).

Градиенты при использовании разрядника типа РВМГ занимают промежуточное положение между значениями для разрядников РВС ($U_{проб}$=530 кВ) и РВРД (кривая *5*). В случае подхода волны со стороны среднего напряжения и при отсутствии разрядника кривая градиентов при наличии одной линии на этой стороне располагается ниже кривой, соответствующей отсутствию линии (кривая *11*), и эти кривые заметно отличаются друг от друга. При подходе волны со стороны среднего напряжения кривые градиентов в обмотках высшего и среднего напряжений (кривые *12*) также существенно различны.

Аналогично тому, что было установлено для напряжения на входе, изменение удаленности разрядников от автотрансформатора и активного сопротивления в широких пределах также почти не влияет на градиенты.

Выводы. 1. Достоверные сведения о перенапряжениях в автотрансформаторе могут быть получены на основе расчета при использовании реальной схемы замещения.

2. Перенапряжения в автотрансформаторе существенно зависят от пробивного напряжения разрядника. Существует такое оптимальное значение пробивного напряжения разрядника, при котором перенапряжения в автотрансформаторе достигают минимального значения. С целью повышения запаса изоляции пробивные напряжения разрядников должны выбираться по их оптимальному значению. Воздействия на изоляцию стандартной волны соответствуют наиболее тяжелому случаю.

3. Изменение сопротивления резистора в широких пределах практически не влияет на перенапряжение и на градиенты в обмотках автотрансформатора.

4. Значительное изменение расстояния (от 30 до 120 м) приводит к небольшим изменениям напряжения на входе автотрансформатора. При этом незначительные изменения градиентов имеют место лишь на начальных участках обмотки.

Приложение. В расчетной схеме, представленной на рис. 1, $Z_{ВН}$ — волновое сопротивление линии, по которой приходит волна на подстанцию; $C_{ср}$ и $L_{ср}$ — емкость и индуктивность петли среза; $C_{вх}$ — входная емкость подстанции; K_1 и K_2, C_1 и C_2, L_1 и L_2, R_1 и R_2 — соответственно продольные и поперечные емкости, индуктивности и активные сопротивления элементов обмоток высшего и среднего напряжений; C_{12} и M — емкость и взаимоиндуктивность между элементами обмоток; $Z_{СН}$ — волновое сопротивление линии на стороне среднего напряжения; $R_н$ — активное сопротивление, включенное в нейтраль трансформатора.

При расчете собственных и взаимных индуктивностей обмоток предполагалось, что третья обмотка автотрансформатора замкнута накоротко и заземлена.

Согласно расчетной схеме для узла $Б$ можно составить дифференциальное уравнение:

$$K_1 \frac{d}{dt}(u_A - u_Б) + i_{АБ} = i_{БВ} + K_1 \frac{d}{dt}(u_Б - u_B) + C_{12}\frac{d}{dt}. \quad (2)$$

Интегрируя (2) почленно, с учетом нулевых начальных условий, после преобразования получаем:

$$\int_0^t (i_{АБ} - i_{БВ})\,dt = -K_1 u_A + (C_1 + C_{12} + 2K_1)\,u_Б - K_1 u_B - C_{12} u_{Б'}. \quad (3)$$

Для j-го элемента обмотки

$$u_j - u_{j+1} = \sum_{k=1}^{n+m} M_{jk}\frac{di_k}{dt} + R_j i_j$$

или после интегрирования

$$\int_0^t (u_j - u_{j+1})\,dt = \sum_{k=1}^{n+m} M_{jk} i_k + R_j \int_0^t i_j\,dt. \quad (4)$$

Из (3) и (4) можно установить:

$$\mathbf{U} = \mathbf{C}^{-1}\int_0^t \delta I\,dt; \quad (5)$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{M}^{-1}\int_0^t (\delta U - IR)\,dt, \quad (6)$$

где $\mathbf{U}$ и $\mathbf{I}$ — соответственно матрицы для напряжений и токов в узлах элементов обмотки; $\mathbf{C}^{-1}$ и $\mathbf{M}^{-1}$ — обратные матрицы емкостей и индуктивностей обмоток:

$$\mathbf{C} = \begin{matrix} C_{10} & C_{20} \\ C_{20} & C_{30} \end{matrix} \qquad \mathbf{C} = \begin{matrix} M_{10} & M_{20} \\ M_{20} & M_{30} \end{matrix}$$

$$\mathbf{C}_{10} = \begin{vmatrix} C'_1 & -K_1 & 0 & \dots & 0 \\ -K_1 & C_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & & & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots \\ \vdots & & & & -K_2 \\ 0 & \dots & & 0 & -K_1\ C''_1 \end{vmatrix};$$

$$\mathbf{C}_{20} = \begin{vmatrix} -C_{12} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ \vdots & & & 0 \\ 0 & \dots & & -C_{12} \end{vmatrix};$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$$\mathbf{C}_{30}=\begin{vmatrix} C''_2 & -K_2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -K_2 & C_2 & -K_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & & & & & \cdot \\ \cdot & & & & & \cdot \\ \cdot & & & & & \cdot \\ \cdot & & & & & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0-K_2 & C''_2 \end{vmatrix};$$

$$\mathbf{M}_{10}=\begin{vmatrix} L_1 & M^{11}_{12} & M^{11}_{13} & \dots & M^{11}_{110} \\ M^{11}_{21} & L_1 & M^{11}_{23} & \dots & M^{11}_{210} \\ \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & & & & M^{11}_{910} \\ M^{11}_{101} & & & \dots & M^{11}_{109}L_1 \end{vmatrix};$$

$$\mathbf{M}_{20}=\begin{vmatrix} M^{12}_{11} & M^{12}_{12} & \dots & M^{12}_{1-0} \\ M^{12}_{22} & M^{12}_{22} & \dots & M^{12}_{210} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & M^{12}_{910} \\ M^{12}_{101} & \dots & M^{12}_{109} & M^{12}_{101} \end{vmatrix};$$

$$\mathbf{M}_{30}=\begin{vmatrix} L_2 & M^{22}_{12} & M^{22}_{13} & \dots & M^{22}_{110} \\ M^{22}_{21} & L_2 & M^{22}_{23} & \dots & M^{22}_{210} \\ \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & & & & M^{22}_{910} \\ M^{22}_{101} & \dots & & M^{22}_{109} & L_2 \end{vmatrix};$$

$$C'_1=C'''_1+C_{12}+K_1+C_{\text{вх}};\quad C_1=C'''_1+C_{12}+2K_1;$$

$$C'_2=C'''_2+C_{12}+K_2;\quad C_2=C'''_2+C_{12}+2K_2;$$

$$C''_1=C'''_1+C_{12}+K_1.$$

Уравнения (1), (5) и (6) решены с помощью ЦВМ БЭСМ-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шишман Д. В.** и др. Вентильные разрядники высокого напряжения. М.: Энергия, 1971.
2. **Джуварлы Ч. М., Бейдуллаев М. А.** Расчет перенапряжений в трансформаторах при срабатывании разрядника. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1974, № 6.
3. **Джуварлы Ч. М., Бейдуллаев М. А., Муфид-заде Н. А.** Определение напряжения на нейтрали трансформатора, заземленной через резистор при срабатывании разрядника. За технический прогресс, 1977, № 2, Баку.
4. **Некрасов М. М.** Защитные зоны разрядников на подстанциях 110 кВ. — Электрические станции, 1941, № 3.

[2.2.1978]

УДК 621.316.1.001.2

Алгоритмы автоматизированного проектирования городских электрических сетей напряжением до 1000 В

Доктор техн. наук ТАРНИЖЕВСКИЙ М. В., инженеры КРИВЦОВ Б. И., ГОРОДНИЧЕВ А. В.

Москва

Проектирование распределительной электрической сети городского микрорайона, в котором должно быть сооружено несколько трансформаторных подстанций (ТП), как правило, начинается с набора нагрузок зданий, питаемых от каждой подстанции. На следующем этапе проектировщик выбирает места установки ТП на плане застройки микрорайона, затем производит выбор конфигурации сети, расчет ее параметров и технико-экономических показателей. Выбор варианта сети производится путем сравнения приведенных затрат. При этом удобно использовать ЦВМ. В статье рассматриваются основные алгоритмы расчетов технико-экономических показателей низковольтной кабельной сети, обслуживаемой одной или несколькими ТП.

Алгоритм набора нагрузок, выбора и оценки зон обслуживания ТП. При разработке алгоритма предполагалось, что местоположение вводно-распределительных устройств (ВРУ) зданий на плане застройки микрорайона определено, известна нагрузка каждого ВРУ и мощности трансформаторных подстанций. Мощности всех ТП принимались одинаковыми. Процесс набора нагрузок зданий, питаемых ТП, осуществляется итеративным методом. Сущность метода заключается в упорядоченном переборе нагрузок зданий, наборе нагрузок и последовательном итеративном улучшении геометрической формы зоны обслуживания каждой ТП. Критерием оценки зон обслуживания ТП служит коэффициент геометрической формы, сущность которого в следующем. Зону обслуживания ТП можно приближенно представить в виде прямоугольника (рис. 1). Очевидно, в зонах обслуживания, представленных прямоугольниками *1* и *4*, потребуется прокладка протяженных кабельных линий. В итоге затраты на построение сети по данным вариантам будут больше оптимальных. Лучшей геометрической формой зоны является квадрат.

Математическое выражение для расчета коэффициента геометрической формы зоны обсуживания ТП

$$x_y=\left|1-\frac{y_т}{x_{т1}}\right|, \qquad (1)$$

где x_y — коэффициент геометрической формы зоны обслуживания ТП; $y_т$, $x_{т1}$ — высота (ось ординат) и ширина (ось абсцисс) зоны обслуживания ТП соответственно.

Значения коэффициентов геометрической формы, близкие к нулю, соответствуют лучшим зонам

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

обслуживания ТП (зона *5* на рис. 1). Все данные о ВРУ должны быть упорядочены, т. е. перенумерованы и записаны в порядке увеличения ординаты y, а затем введены в ЦВМ. В такой же последовательности производится упорядоченный перебор нагрузок ВРУ зданий. В процессе перебора в результате очередных итераций формируются зоны обслуживания ТП.

Блок-схема алгоритма итеративного набора нагрузок зданий и формирования зон обслуживания ТП района новой застройки состоит из восьми взаимодействующих блоков. В процессе перебора ВРУ нагрузки зданий рассчитываются с учетом коэффициентов спроса и совмещения нагрузок на шинах ТП по принятым нормативам.

Необходимая нагрузка для одной подстанции набирается с учетом ограничения:

$$S \leqslant S_т k_т, \qquad (2)$$

где S — набираемая (расчетная) нагрузка на шинах ТП, кВ·А; $S_т$ — номинальная мощность трансформаторов в ТП, кВ·А; $k_т$ — коэффициент допустимой загрузки трансформаторов в нормальном режиме работы.

Набор нагрузок осуществляется полосами с последующим преобразованием полос в квадраты. Границы полосы нагрузок определяются по наибольшим и наименьшим значениям координат ВРУ, находящимся в полосе: x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}. После определения границ полосы нагрузок рассчитывается критерий геометрической формы зоны обслуживания ТП по уравнению (1). Для этого предварительно рассчитываются размеры полосы нагрузок:

$$x_т = x_{max} - x_{min}; \qquad (3)$$

$$y_т = y_{max} - y_{min} \qquad (4)$$

и ширина зоны нагрузки (по абсциссе) одной подстанции:

$$x_{т1} = x_т / N_т, \qquad (5)$$

где $N_т$ — число ТП в полосе нагрузки.

Данные о границах полосы нагрузок и критерии геометрической формы зоны обслуживания пересылаются в блок памяти. Процесс набора и формирования полос нагрузок осуществляется последовательно для одной ТП, для двух ТП, для трех ТП и так далее до тех пор, пока критерий геометрической формы зоны обслуживания ТП не перестанет уменьшаться. В этом случае заканчивается процесс набора нагрузок первой итерации. Если просчитан не весь район застройки, то выполняются вторая и последующие итерации.

Алгоритм выбора оптимальных координат местоположения ТП. Размещение трансформаторных подстанций на плане застройки микрорайона чаще всего основано на интуиции проектировщика и производится без технико-экономического обоснования. Неправильный выбор местоположения ТП приводит к перерасходу средств на строительство сети, а при эксплуатации — к завышенным ежегодным затратам. Оптимальным координатам местоположения ТП соответствует минимум приведенных годовых затрат.

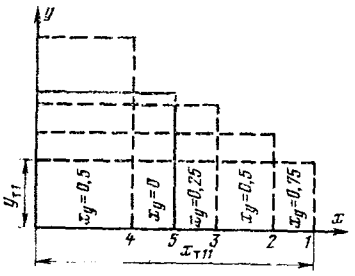


Рис. 1. Итеративное преобразование зоны питания от ТП.

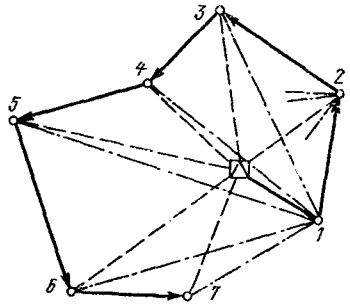


Рис. 2. Схема формирования контурной связи между ВРУ зданий в зоне питания от ТП.

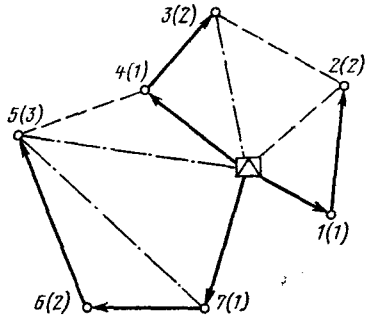


Рис. 3. Схема формирования отходящих от ТП линий.

Исходя из изложенного, можно дать следующую математическую формулировку задачи: требуется определить минимальные приведенные затраты $З_{опт}$ на сеть низкого напряжения в зависимости от координат x, y местоположения ТП в зоне обслуживания:

$$З_{опт} = \min\{З_{i,j}(x_i, y_{i,j})\} \qquad (6)$$

при

$$\left.\begin{aligned} x_{min} \leqslant x_i \leqslant x_{max}, \\ y_{min} \leqslant y_{i,j} \leqslant y_{max} \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

и технических ограничениях:

$$\Delta U_п \leqslant \Delta U_д;\ S_п \leqslant S_д;\ S_т \leqslant S_{т.д}, \qquad (8)$$

где $З_{i,j} = f(q, n, m, l, x, y, S, k)$; x_{min}, y_{min}, x_{max}, y_{max} — минимальные и максимальные координаты ТП, ограниченные зоной обслуживания подстанции; $\Delta U_п$, $\Delta U_д$ — фактические и допустимые потери напряжения в линиях; $S_п$, $S_д$ — фактические и допустимые нагрузки линий; $S_т$, $S_{т.д}$ — фактические и допустимые загрузки трансформаторов в ТП; q — сечения кабелей в линиях; n — количество отходящих линий; m — количество кабелей в линии; l — длины линий; x, y, S — координаты ВРУ и мощности на шинах ВРУ; k — коэффициенты совмещения нагрузок зданий.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

В основе рассматриваемого расчетного алгоритма лежит методика планирования активного эксперимента [Л. 1] [1]. В активном эксперименте интуитивное расположение ТП на плане застройки заменяется алгоритмизированным, заданным матрицей планирования эксперимента. Обработка результатов спланированного эксперимента дает возможность установить приближенное аналитическое выражение зависимости приведенных расчетных годовых затрат на кабельную сеть низкого напряжения от координат местоположения ТП:

$$З=b_0+b_1x+b_2y, \qquad (9)$$

где $З$ — приведенные затраты на кабельную сеть; x, y — координаты ТП; b_0, b_1, b_2 — коэффициенты уравнения регрессии.

Полученная линейная математическая модель используется для расчета движения в направлении антиградиента. Новые опыты ставятся только в этом направлении и до тех пор, пока движение по антиградиенту не перестанет давать эффект, т. е. до достижения почти стационарной области. Пологий характер изменения параметра оптимизации в зоне минимума позволяет ограничиться линейной аппроксимацией зависимости приведенных затрат от координат местоположения ТП.

Для расчета технико-экономических показателей низковольтной кабельной сети, обслуживаемой одной ТП, необходимо знать не только нагрузку и расположение ВРУ зданий, но и направления питания ВРУ от ТП, т. е. конфигурацию кабельной сети. С этой целью производится оценка размещения ВРУ зданий по отношению к ТП и по отношению к каждому вводу, которая осуществляется следующим образом:

в процессе перебора координат ВРУ выбирается ближайший к ТП ввод;

по отношению к выбранному вводу выбирается другой ближайший к нему ввод;

к последующему выбранному вводу выбирается ближайший ввод и т. д.

В ходе последовательной оценки размещения ВРУ зданий определяется контурная граница размещения вводов в зоне обслуживания ТП (рис. 2).

Формирование отходящих от ТП линий производится в той же последовательности, что и оценка размещения ВРУ зданий. Основой для формирования служит нумерация вводов по контурной границе, а также количество вводов, питаемых по линиям. Пример формирования отходящих от ТП линий показан схематически на рис. 3, где контурная граница размещения вводов принята такой же, как и на рис. 2. В соответствии с заданным количеством вводов на линиях по узлам *2—3* и *4—5* делаются разрезы. Затем для оставшихся участков линий выбираются ближайшие к ТП концевые ВРУ. Далее для каждой линии определяется направление питания от ТП к ближайшему ВРУ, а от этого ВРУ — к последующим. Вводы на каждой линии нумеруются в соответствии с последовательностью их питания от ТП. Длины участков линий определяются по координатам ВРУ и ТП. Учет криволинейности трассы осуществляется введением коэффициента $k_у=1{,}25$.

На выбор сечений кабельных линий накладываются технические ограничения по допустимым нагрузкам и допустимым потерям напряжения:

$$0{,}8S_д \geqslant S_1; \qquad (10)$$

$$k_3S_д \geqslant S_2; \qquad (11)$$

$$\Delta U_д \geqslant \Delta U_ф, \qquad (12)$$

где $S_д$ — допустимая 100%-ная нагрузка на кабель кВ·А; S_1, S_2 — фактическая нагрузка в нормальном и аварийном режимах работы соответственно, кВ·А; k_3 — коэффициент допустимой нагрузки на кабель в аварийном режиме работы; $\Delta U_д$, $\Delta U_ф$ — допустимые и фактически потери напряжения в линии в нормальном режиме работы, %.

Для зоны обслуживания ТП определяются следующие технико-экономические показатели; суммарные потери мощности в кабелях, суммарная длина кабелей, сечения и количество кабелей на участках линий, капитальные вложения и приведенные затраты.

Приведенные затраты на кабельную сеть

$$З_{к.с}=E_кK_к+E_1\Delta P_с, \qquad (13)$$

где $K_к$ — суммарные капиталовложения на кабельную сеть, тыс. руб.; $E_к$ — суммарный нормативный коэффициент отчислений на амортизацию (0,04), капитальный ремонт (0,003), обслуживание сети (0,015) и нормативный коэффициент эффективности (0,12), 1/год; $E_1=0{,}0496$ тыс. руб/(кВт·год) — стоимость потерь электроэнергии в кабельной сети 0,38 кВ за год; $\Delta P_с$ — суммарные потери мощности, кВт.

Приведенные затраты на ТП

$$З_m=E_тK_т+\Delta P_1E_2+\Delta P_2E_3k^2_{з.т}, \qquad (14)$$

где $K_т$ — капитальные вложения, тыс. руб.; $E_т=0{,}224$ 1/год — суммарный нормативный коэффициент отчислений для ТП; $E_2=0{,}1209$ тыс. руб/(кВт·год) — стоимость потерь холостого хода (2) в трансформаторах ТП, а $E_3=0{,}0481$ тыс. руб/(кВт·год) — стоимость нагрузочных потерь в трансформаторах за год; ΔP_1, ΔP_2 — потери холостого хода и нагрузочные потери при номинальной нагрузке трансформаторов соответственно, кВт; $k_{з.т}$ — коэффициент загрузки трансформаторов в ТП.

Последовательность расчетов оптимальных координат местоположения ТП следующая.

1. Исходной информацией служат результаты расчетов по рассмотренному выше алгоритму. Эта информация оценивается проектировщиком и при необходимости корректируется, а затем вводится в ЦВМ.

2. Информация формируется по зонам обслуживания ТП в соответствии с программой расчетов.

3. Определяется геометрический центр ВРУ для очередной зоны обслуживания ТП по формулам:

$$x_ц=\frac{\sum_1^n x_{вп}}{N_в}; \quad y_ц=\frac{\sum_1^n y_{вп}}{N_в}, \qquad (15)$$

[1] **Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

где $x_{вп}$, $y_{вп}$ — координаты ВРУ зданий, м; $N_в$ — количество вводов в зоне обслуживания ТП; $x_ц$, $y_ц$ — координаты геометрического центра ВРУ в зоне обслуживания ТП, м.

4. Определяются экспериментальные точки расположения ТП. Поскольку факторов два, целесообразно использование матрицы планирования полного факторного эксперимента типа 2^k, для которой число «опытов» равно 4. Всего ставится пять опытов: один — при расположении ТП в нулевой точке, четыре — при расположении ТП в соответствии с матрицей планирования. В качестве нулевой точки на первом этапе принимается геометрический центр нагрузок. Интервал варьирования координат местоположения ТП принимается в пределах от 30 до 40 метров.

5. Определяется контурная граница размещения ВРУ в очередной зоне обслуживания ТП. Полученное формализованное представление о размещении ВРУ на плане застройки используется для формирования отходящих от ТП линий.

6. Осуществляются две циклические операции:

выбор направления питания по линии с заданным количеством вводов;

перенумерация вводов на линии и запоминание информации о вводах в соответствии с новой нумерацией.

В зависимости от этажности зданий ТП и ВРУ связываются или петлевыми, или двухлучевыми линиями.

7. Расчет нагрузок участков линий осуществляется аналогично расчету нагрузок по представленному выше алгоритму итеративного набора нагрузок, но, учитывая необходимость расчета нагрузок линий в нормальном и аварийном режимах, программа расчета дополняется логическими и условными операторами, позволяющими рассчитывать нагрузки в указанных режимах для петлевых и двухлучевых линий.

8. Определяются сечения и число кабелей для участков линий с учетом технических ограничений.

9. Рассчитываются технико-экономические показатели для всех отходящих от ТП линий. Определяются приведенные затраты на кабельную сеть, ТП и суммарные.

10. Технико-экономические показатели кабельной сети, определенные при расположении ТП в нулевой точке, пересылаются в блок памяти.

11. Координаты других точек расположения ТП определяются по матрице планирования эксперимента. Технико-экономические показатели кабельной сети при расположении ТП в этих точках определяются в результате циклической работы по пунктам 4-11 при переходе от одного опыта к другому.

12. После завершения расчетов технико-экономических показателей кабельной сети при расположении ТП в точках заданных матрицей планирования эксперимента, ставится серия опытов в направлении антиградиента. Для этого определяются значения и знаки коэффициентов регрессии, рассчитывается шаг движения по антиградиенту и ТП перемещается из нулевой точки в точку, расположенную на антиградиенте.

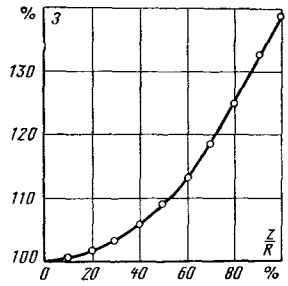


Рис. 4. Зависимость приведенных затрат на распределительную сеть 0,4 кВ микрорайона от отношения смещения ТП от точки оптимума к радиусу зоны ее обслуживания.

13. После п. 12 управление расчетом всегда передается п. 4, а затем — последующим пунктам. При этом для нулевой точки нового эксперимента определяется контурная граница между вводами, конфигурация линий, рассчитываются нагрузки и технико-экономические показатели, включая приведенные затраты на кабельную сеть. Затраты сравниваются с затратами на кабельную сеть при расположении ТП в заданной точке предыдущего эксперимента (оператор связи между пунктами 9 и 10). Если затраты снижаются, то сначала осуществляется пересылка полученных технико-экономических показателей в блок памяти, а затем — переход на второй этап расчетов.

14. Второй и каждый последующий этап начинается с расчетов координат ТП, определяемых вершинами квадрата нового плана эксперимента, в котором для нулевой точки расчеты сети были выполнены на предыдущем этапе.

Из п. 11 управление передается п. 4, последующим пунктам и снова п. 11. Операции циклически повторяются для всех четырех точек расположения ТП.

В зависимости от полученных результатов осуществляется переход на новый этап расчетов или на печать информации.

Такой алгоритм реализован на ЦВМ БЭСМ-4М.

В ходе расчетов могут возникнуть отдельные ситуации, когда оптимальное место размещения ТП на плане микрорайона не может быть реализовано из-за наличия проездов, зданий и т. д. В подобных случаях подстанцию приходится отнести на небольшое расстояние от точки оптимума.

Результаты расчетов, выполненных по разработанной методике, свидетельствуют о том, что существенное смещение ТП из точки оптимума в значительной мере влияет на приведенные затраты на строительство и эксплуатацию распределительной сети до 1000 В. Особенно сильно эта тенденция сказывается в микрорайонах с большой плотностью нагрузки, т. е. в районах новой застройки со зданиями в 9—20 этажей с электроплитами. На рис. 4 показана расчетная зависимость изменения приведенных затрат и на распределительную сеть 0,4 кВ от отношения смещения ТП от точки оптимума Z к радиусу зоны ее обслуживания R. Эта зависимость определена для ТП мощностью 1×400 кВ·А; зона обслуживания ТП $R=110$ м, плотность нагрузки 7,5 МВт/км^2.

[26.10.1978]

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

УДК 621.332.3.064.1.001.24

Расчет токораспределения при коротких замыканиях в тяговых сетях 2×25 кВ

МАРКВАРДТ К. Г., КОСАРЕВ Б. И., КОСОЛАПОВ Г. Н., ЧЕРНОВ Ю. А.

Москва

Одной из наиболее прогрессивных и широко применяемых систем энергоснабжения электрических железных дорог считается система тяги на переменном токе промышленной частоты напряжением в тяговой сети 25 кВ. Однако непрерывный рост грузопотока, скоростей движения ведет к увеличению потребляемой мощности и, как следствие, к увеличению потерь напряжения и энергии в тяговой сети, уменьшению расстояния между тяговыми подстанциями. Серьезным недостатком существующей системы энергоснабжения является значительное индуктивное влияние тяговой сети на различные коммуникации, расположенные вдоль железнодорожных линий (воздушные и кабельные линии связи, трубопроводы, электрические сети низкого напряжения и т. д.).

Система энергоснабжения переменного тока с автотрансформаторами (АТ) [Л. 1 и 2], так называемая система 2×25 кВ, которая применяется в настоящее время в Японии для электрификации строящихся магистральных железных дорог, значительно снижает потери напряжения и энергии, уменьшает электромагнитное влияние тяговой сети, позволяет увеличить расстояние между тяговыми подстанциями.

Подробное описание системы 2×25 кВ приведено в [Л. 3].

В СССР планируется опытная электрификация по системе 2×25 кВ участка железной дороги Вязьма — Орша. К числу проблем, подлежащих решению в ближайшее время, относится обоснование и выбор способа заземления устройств контактной сети и СЦБ, исследование условий электробезопасности при обслуживании рельсовых путей и соединенных с ними устройств, защита от токов короткого замыкания. Сказанное требует создания методик, расчета токораспределения по элементам тяговой сети системы 2×25 кВ и распределения напряжения «рельсы — земля».

Электрический расчет участка тяговой сети системы 25 кВ, даже при учете однородной рельсовой цепи как цепи с распределенными параметрами, обычно несложно провести аналитически. Однако аналитический расчет небольшого участка тяговой сети системы 2×25 кВ приводит к значительным трудностям из-за большого числа постоянных интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих электрические процессы в этой сети. Если в некоторых случаях и удается получить аналитическое решение, то из-за своей сложности оно не имеет практического значения. Реализация поставленной задачи проводилась по пути создания простейшей схемы замещения тяговой сети, которая позволила бы с приемлемой для инженерных расчетов точностью получить основные соотношения, пригодные для любого участка цепи. С этой целью было проведено довольно подробное исследование участка тяговой сети с односторонним питанием. Расчет токораспределения по участку с двухсторонним питанием методом наложения был сведен к расчету двух схем с односторонним питанием.

Степень общности полученных зависимостей устанавливалась электрическим расчетом математической модели тяговой сети 2×25 кВ на ЦВМ «Наири-2».

Примем следующий порядок обозначений. Автотрансформаторные участки (АТ-участки) — так будем именовать участки тяговой сети между двумя соседними АТ — нумеруются, начиная с первого в направлении от тяговой подстанции A к месту короткого замыкания и далее к тяговой подстанции $Б$; АТ-участку, на котором находится место короткого замыкания, присваивается номер i. Тогда АТ-участкам, находящимся на границе $(i-1)$ и $(i+1)$, присваиваются соответственно i и $(i+1)$ номера.

При расчете тяговой сети используем следующие величины: $z_к$ — удельное сопротивление контура «контактная подвеска однопутного участка — земля», Ом/км; $z_ф$ — удельное сопротивление контура «дополнительный провод — земля», Ом/км; $z_р$ — удельное сопротивление контура «рельсы — земля», Ом/км; z_h — удельное сопротивление взаимоиндукции между контурами «контактная сеть — рельсы», «дополнительный провод — рельсы», «контактная сеть — рельсы», «дополнительный провод — рельсы», «контактная сеть — дополнительный провод»; в расчете все сопротивления взаимоиндукции принимаются равными [Л. 4], Ом/км; $r_п$, g — соответственно переходное сопротивление (Ом/км) проводимость (Сим·км) «рельсы—земля»; $\gamma=\sqrt{z_р/r_п}$ — коэффициент распространения рельсового пути, км$^{-1}$; $z_в=\sqrt{z_р r_п}$ — волновое сопротивление рельсового пути, Ом; $z_{АТ}$ — сопротивление АТ; $z_{сА\,(Б)}$ — сопротивление системы, включая сопротивление подстанций $A(Б)$; $L_{A\,(Б)}$ — длина контактной сети между подстанцией $A(Б)$ и $АТ_i$ ($АТ_{i+1}$, км; $1-\mu=1-\frac{z_h}{z_р}$ — коэффициент экранирования рельсового пути; l_{12} — расстояние между $АТ_i$ и местом короткого замыкания; $l_{23}=l_i-l_{12}$; $\dot{I}_{A\,(Б)}$ — ток фидера подстанции $A(Б)$; $\dot{E}_{A\,(Б)}$ — напряжение холостого хода на шинах подстанции $A(Б)$.

Исследование токораспределения в системе 2×25 кВ применительно к математической модели тяговой сети, представленной на рис. 1, т. е. с учетом продольной и поперечной неоднородностей, вызванных включением АТ и наличием станционных путей, с учетом рельсовой цепи как цепи с распределенными параметрами, приводит к созданию алгоритма, реализовать который из-за большого числа уравнений с комплексными коэффициентами на ЦВМ типа «Наири» не удается и требует применения более мощных машин, что в практических условиях крайне нежелательно.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Порядок системы дифференциальных уравнений, описывающих схему замещения тяговой сети, определяется, в первую очередь, количеством *АТ*-участков. Поэтому задача выбора расчетной схемы сводится к отысканию минимального количества *АТ*-участков, которые позволили бы получить основные зависимости в виде конечных выражений.

Как показали электрические расчеты простейшей схемы замещения тяговой сети 2×25 кВ [Л. 5], а затем расчеты математической модели (рис. 1), для удаленных коротких замыканий при расчете токов короткого замыкания на i-м *АТ*-участке можно пренебрегать шунтирующим действием других *АТ*, а также не учитывать рельсовый путь между подстанцией и $АТ_i$. Фактически это означает, что участок тяговой сети между $АТ_i$ и подстанцией заменяется сопротивлением двухпроводной питающей линии «контактная сеть — дополнительный провод» и определяется по формуле:

$$z_{т,\,сА}=(z_к+z_ф-2z_h)\,L_A.$$

Схему замещения для расчета токораспределения необходимо выбирать в зависимости от способа подключения тягового трансформатора к тяговой сети и положения точки короткого замыкания относительно тяговой подстанции. Из шести способов питания тяговой сети 2×25 кВ, объединяя их по режиму работы отсоса, имеем три случая:

последовательное соединение двух трехфазных трансформаторов с группами соединений Y/Δ—11 и Y/Δ—1 [Л. 6] либо питание от однофазного трансформатора с расщепленной вторичной обмоткой; средняя точка не соединена с рельсами;

тот же случай, но средняя точка соединена с рельсами;

однофазный или трехфазный трансформатор с $U_н$=27,5 кВ и повысительный АТ у подстанции.

Тогда в качестве схемы замещения тяговой сети при расчете токов удаленного короткого замыкания для первых двух случаев включения тяговых трансформаторов можно использовать схему (рис. 2,*а*); при коротком замыкании между $АТ_1$ и подстанцией (второй случай) схема замещения имеет вид (рис. 2,*б*). При питании тяговой сети по схеме третьего случая схема замещения для удаленного короткого замыкания представлена на рис. 2,*в*, для короткого замыкания на первом *АТ*-участке схема замещения представлена на рис. 2,*г*.

Для оценки погрешности, обусловленной принятым выше допущением, при определении токов короткого замыкания были проведены расчеты математической модели тяговой сети и схемы замещения с двумя АТ. Как следует из расчетов, шунтирующее действие АТ, а следовательно, и погрешность расчетов при переходе к схемам замещения зависит прежде всего от характеристик АТ, соотношения длин питающего короткое замыкание и соседнего со стороны подстанции АТ-участков, переходного сопротивления «рельсы — земля». Однако во всех случаях расхождения, как показывают расчеты на ЦВМ, не превышают 10%, что вполне допустимо.

Известно, что $r_п$ есть случайная величина [Л. 7]. Учитывая это, исследовали токораспределение при

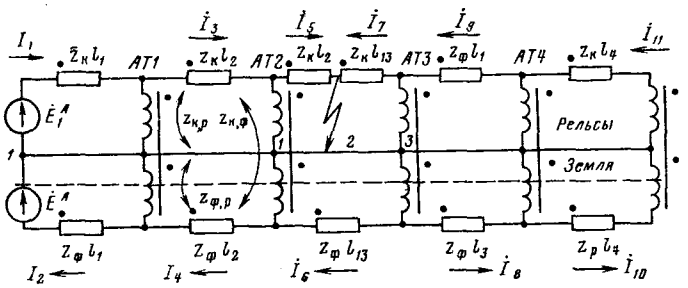


Рис. 1. Математическая модель тяговой сети 2×25 кВ при одностороннем питании.

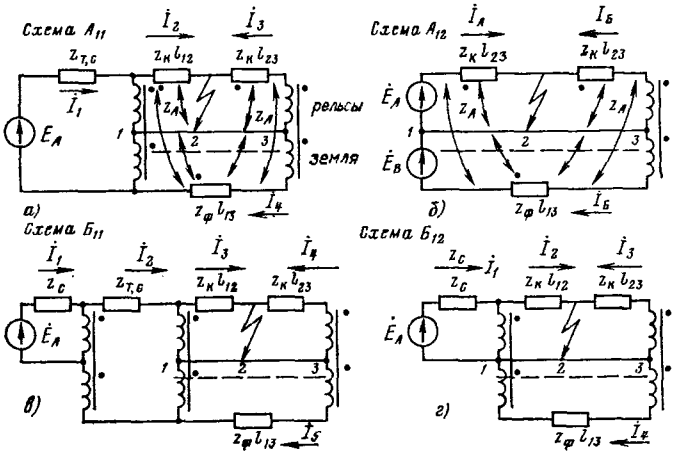


Рис. 2. Схемы замещения тяговой сети 2×25 кВ при одностороннем питании.

изменении $r_п$ от 0 до ∞. Расчеты показали, что с погрешностью, не превышающей 10%, целесообразно при определении токораспределения полагать $r_п$=0.

Основные соотношения для токов в тяговой сети 2×25 кВ. *Одностороннее питание.* Выше было показано, что при одностороннем питании однопутного участка тяговой сети 2×25 кВ в зависимости от способа включения тягового трансформатора и положения точки короткого замыкания относительно подстанции токораспределение на i-м участке можно рассчитать по одной из четырех схем методом контурных токов [Л. 8]. Кроме того, сопротивления АТ ($z_{АТ}$) определялись из опытов короткого замыкания и холостого хода. При выводе формул также принималось, что коэффициент связи между полуобмотками АТ близок к единице, а число витков в полуобмотках одинаково. Сказанное позволяет сделать предположение о равенстве сопротивлений само- и взаимоиндукции полуобмоток *АТ*.

Для решения схемы $А_{11}$ (рис. 2,*а*) методом контурных токов необходимо предварительно определить значения потенциалов рельсов в местах подключения АТ к рельсовой цепи и месте короткого замыкания (рис. 3, точки *1*, *2*, *3*), а также значения средних токов в рельсах на участках l_{12}, l_{23} и l_i. Для этого разобьем схему на ряд однородных участков (рис. 3,*б*) и запишем все потенциалы и средние токи в виде функций контурных токов I_2, I_3, I_4 и проводимости «рельс — земля».

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

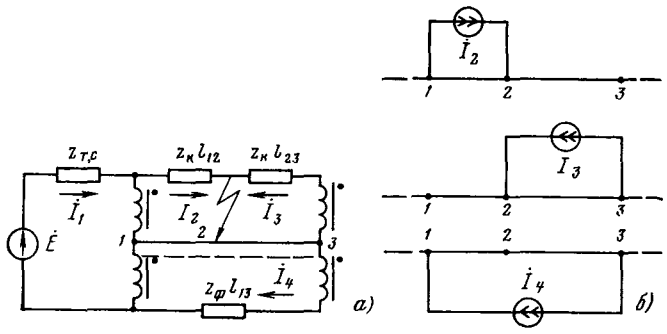


Рис. 3. Применение метода сведения расчета сложных тяговых сетей к расчету ряда однородных для схемы замещения тяговой сети 2×25 кВ.

Для краткости приведены только суммарные значения потенциалов и токов, однако в этих выражениях коэффициенты перед токами — решения однородных схем в данных точках и на данных участках:

$$\dot{\varphi}_1=\frac{1}{2}(1-\mu)z_в\left[-(1-e^{-\gamma l_{12}})\dot{I}_2+\right.$$
$$\left.+(1-e^{-\gamma l_{23}})e^{-\gamma l_{12}}\dot{I}_3+(1-e^{-\gamma l_i})\dot{I}_4\right];$$
$$\dot{\varphi}_2=\frac{1}{2}(1-\mu)z_в\left[(1-e^{-\gamma l_{12}})\dot{I}_2+(1-e^{-\gamma l_{23}})\dot{I}_3+\right.$$
$$\left.+(e^{-\gamma l_{12}}-e^{-\gamma l_{23}})\dot{I}_4\right];$$
$$\dot{\varphi}_3=\frac{1}{2}(1-\mu)z_в\left[(1-e^{-\gamma l_{12}})e^{-\gamma l_{23}}\dot{I}_2-\right.$$
$$\left.-(1-e^{-\gamma l_{23}})\dot{I}_3-(1-e^{-\gamma l_i})\dot{I}_4\right];$$
$$\dot{I}_{ср12}=-\left[\frac{1-\mu}{\gamma l_{12}}(1-e^{-\gamma l_{12}})+\mu\right]\dot{I}_2-$$
$$-\frac{1-\mu}{2\gamma l_{12}}(1-e^{-\gamma l_{12}})(1-e^{-\gamma l_{23}})\dot{I}_3+$$
$$+\left[\frac{1-\mu}{2\gamma l_{12}}(1-e^{-\gamma l_{12}})(1+e^{-\gamma l_{23}})+\mu\right]\dot{I}_4;$$
$$\dot{I}_{ср23}=\frac{1-\mu}{2\gamma l_{23}}(1-e^{-\gamma l_{12}})(1-e^{-\gamma l_{23}})\dot{I}_2+$$
$$+\left[\frac{1-\mu}{\gamma l_{23}}(1-e^{-\gamma l_{23}})+\mu\right]\dot{I}_3+$$
$$+\left[\frac{1-\mu}{2\gamma l_{23}}(1+e^{-\gamma l_{12}})(1-e^{-\gamma l_{23}})+\mu\right]\dot{I}_4;$$
$$\dot{I}_{срi}=-\left[\frac{1-\mu}{2\gamma l_i}(1-e^{-\gamma l_{12}})(1+e^{-\gamma l_{23}})+\mu\right]\dot{I}_2+$$
$$+\left[\frac{1-\mu}{2\gamma l_i}(1+e^{-\gamma l_{12}})(1-e^{-\gamma l_{23}})+\mu\right]\dot{I}_3+$$
$$+\left[\frac{1-\mu}{\gamma l_i}(1-e^{-\gamma l_i})+\mu\right]\dot{I}_4.$$

При $r_п=0$ выражения для средних токов и потенциалов значительно упрощаются и принимают вид:

$$\dot{\varphi}_1=\dot{\varphi}_2=\dot{\varphi}_3=0;$$
$$\dot{I}_{ср12}=\mu(\dot{I}_4-\dot{I}_3);\ \dot{I}_{ср23}=\mu(\dot{I}_4+\dot{I}_3);$$
$$\dot{I}_{срi}=\mu(\dot{I}_4+\dot{I}_3-\dot{I}_2).$$

Подставив значения потенциалов и средних токов в уравнения для контурных токов и решив их, получим:

$$\dot{I}_{к,э}=2\dot{I}_1=\frac{2\dot{E}_A}{z_1};$$
$$z_{к,э}=z_1=z_{сA}+z_{т,с\ A}+z_{AT}+4(z_к-\mu z_h)l_{12}-$$
$$-\frac{(2z_к l_{12}+z_{AT})^2}{(z_к+z_ф)l_i+2z_{AT}};$$
$$\dot{I}_3=\dot{I}_{к,э}\frac{z_к l_{12}+0{,}5z_{AT}}{(z_к+z_ф)l_i+2z_{AT}};$$
$$\dot{I}_4=\dot{I}_{к,э}-\dot{I}_3.$$

Аналогично для схемы A_{12} (рис. 2,*б*)

$$\dot{I}_A=\frac{\dot{E}_A z_Б+\dot{E}_Б z_{AБ}}{z_A z_Б-z^2_{AБ}};\ \dot{I}_Б=\frac{\dot{E}_Б z_A+\dot{E}_A z_{AБ}}{z_A z_Б-z^2_{AБ}};$$
$$\dot{I}_{к,э}=\dot{I}_A+\dot{I}_Б;$$
$$z_A=z_{сA}+(z_к-\mu z_h)l_{12};\ z_{AБ}=(1-\mu)z_h l_{12};$$
$$z_Б=z_{сБ}+z_{AT}+(z_к+z_ф)l_{23}+(z_ф-\mu z_h)l_{12}.$$

Если положить $\dot{E}_A=\dot{E}_Б$, тогда

$$\dot{I}_Б=\dot{I}_{к,э}\frac{z_{сA}+z_к l_{12}}{z_{сA}+z_{сБ}+(z_к+z_ф)l_i+z_{AT}}.$$

Для схемы $Б_{11}$ (рис. 2,*в*)

$$\dot{I}_{к,э}=\dot{I}_1=\frac{\dot{E}_A}{Z_1};$$
$$z_{к,э}=z_1=z_{сA}+\frac{1}{4}z_{т,с}+\frac{1}{2}z_{AT}+$$
$$+(z_к-\mu z_h)l_{12}-\frac{(z_к l_{12}+0{,}5z_{AT})^2}{(z_к+z_ф)l_i+2z_{AT}};$$
$$\dot{I}_4=\dot{I}_{к,э}\frac{z_к l_{12}+0{,}5z_{AT}}{(z_к+z_ф)l_i+2z_{AT}};\ \dot{I}_3=\dot{I}_{к,э}-\dot{I}_4.$$

Для схемы $Б_{12}$ (рис. 2,*г*)

$$\dot{I}_{к,э}=\dot{I}_1=\frac{\dot{E}_A}{Z_1};$$
$$z_{к,э}=z_1=[(z_к+z_ф)l_{13}-z_к l_{12}+$$
$$+2z_{AT}]\frac{z_{сA}+(z_к-\mu z_h)l_{12}}{(z_к+z_ф)l_i+2z_{AT}};$$
$$\dot{I}_3=\dot{I}_{к,э}\frac{z_к l_{12}}{(z_к+z_ф)l_i+2z_{AT}};$$
$$\dot{I}_4=\dot{I}_{к,э}-\dot{I}_3.$$

В таблице приведены значения сопротивлений тяговой сети 2×25 кВ, вычисленные по предлагаемым формулам ($z_{к,э}$) и взятые из статьи [Л. 9] ($z^*_{к,э}$). Малое различие между этими значениями подтверждает достоверность полученных результатов.

При расчетах опасного влияния тяговой сети на линии связи необходимо знать токораспределение по элементам тяговой сети до и за питающим *АТ*-участком, т. е. на тех участках, которые при расчете схем замещения не учитывались.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Для определения тока за питающим AT-участком, как показали исследования, можно пользоваться следующим рекуррентным соотношением:

$$\dot{I}_{\Phi(i+1)} \approx \dot{I}_{\text{к}(i+1)} = \dot{I}_{\text{к}i} \times$$
$$\times \frac{z_{AT}\left[(z_{\text{к}}+z_{\Phi})\,l_i + 2z_{AT}\right]}{\left[(z_{\text{к}}+z_{\Phi})\,l_i + 2z_{AT}\right]\left[(z_{\text{к}}+z_{\Phi})\,l_{i+1} + 2z_{AT}\right] - z^2_{AT}},$$

где $\dot{I}_{\text{к}(i+1)}$, $\dot{I}_{\Phi(i+1)}$ — соответственно токи в контактной подвеске и дополнительном проводе $(i+1)$-го AT-участка.

Токи, протекающие по контактной сети и дополнительному проводу между подстанцией и питающим AT-участком, зависят от координаты точки короткого замыкания и параметров промежуточных AT-участков и описываются сложными выражениями, практически не пригодными для инженерных расчетов. Для определения этих токов, как показали расчеты, удовлетворительная точность обеспечивается следующими выражениями:

$$\dot{I}_{ATi} = \dot{I}_{\text{к,з}} \frac{(z_{\text{к}}+z_{\Phi})\,l_i + 2z_{AT}}{(z_{\text{к}}+z_{\Phi})\,l_i + 2z_{AT}} \cdot \frac{\left[z_{\text{к}} l_{i-1} + z_{AT}\left(\frac{1}{2} + \frac{\dot{I}_{\Phi i}}{\dot{I}_{\text{к,з}}}\right)\right]\left[(z_{\text{к}}+z_{\Phi})\,l_{i+1} + 2z_{AT}\right] - \frac{1}{2}\,z^2_{AT}}{\left[(z_{\text{к}}+z_{\Phi})\,l_{i+1} + 2z_{AT}\right] - z^2_{AT}} - \dot{I}_{\Phi i};$$

$$\dot{I}_{\Phi(i-1)} = \dot{I}_{\Phi i} + \dot{I}_{ATi};$$

$$\dot{I}_{\text{к}(i-1)} = \dot{I}_{\text{к,з}} - \dot{I}_{\Phi(i-1)},$$

где $\dot{I}_{AT\,i}$ — ток, протекающий через полуобмотку AT, расположенного между i и $(i-1)$ AT-участками.

Током, протекающим через $(i-2)$ AT-участок, расположенный между $(i-2)$ и $(i-3)$ AT-участками, даже в случае короткого замыкания можно пренебречь, тогда токи в контактной сети и дополнительном проводе между $(i-1)$ AT-участком и подстанцией определяются из выражений:

$$\dot{I}_{\text{к}} = \dot{I}_{\text{к,з}} \frac{z_{\Phi}}{z_{\text{к}}+z_{\Phi}}; \quad \dot{I}_{\Phi} = \dot{I}_{\text{к,з}} \frac{z_{\text{к}}}{z_{\text{к}}+z_{\Phi}}.$$

Здесь следует отметить, что все выражения, описывающие токораспределение в тяговой сети, являются функциями тока короткого замыкания, который можно рассматривать как источник тока величиной $\dot{I}_{\text{к, з}}$. Тогда правомерно применение полученных выше выражений и для тяговой нагрузки, используя для нескольких нагрузок принцип наложения.

Двухстороннее питание. Расчет токораспределения в тяговой сети 2×25 кВ при двухстороннем питании может быть сведен к расчету двух схем с односторонним питанием [Л. 8]. Последовательность в этом случае следующая: определяем токи фидеров тяговых подстанций, затем, включая вместо источников э. д. с. два источника тока с токами, равными фидерным, переходим к двум схемам с односторонним питанием. Используя ранее полученные соотношения, находим необходимые токи. Складывая их алгебраически, получаем общую картину токораспределения.

$L_A + l_{12}$	Значения сопротивлений		
	$z^*_{\text{к, з}}$	$z_{\text{к, з}}$	Относительная погрешность, %
5	1,68	1,73	3,0
10	1,78	1,82	2,2
12,5	3,0	3,11	3,7
27,5	5,93	6,05	2,0
35	7,61	7,84	3,0

Рассуждая аналогично, как и в случае с односторонним питанием, приходим к четырем основным схемам замещения: A_{21}, A_{22}, $Б_{21}$, $Б_{22}$, представленным на рис. 4. Токи фидеров для первых трех схем замещения определяем из выражений:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A z_B - \dot{E}_Б z_{AБ}}{z_A z_Б - z^2_{AБ}}; \quad \dot{I}_Б = \frac{\dot{E}_B z_A - \dot{E}_A z_{AБ}}{z_A z_Б - z^2_{AБ}},$$

где для схемы A_{21} (рис. 4,*а*)

$$z_{A\,(Б)} = z_{\text{т, с}\,A\,(Б)} + z_{AT} + 4\,(z_{\text{к}} - \mu z_h)\,l_{12(23)} - 4\,\frac{\left(z_{\text{к}} l_{12(23)} + \frac{1}{2}\,z_{AT}\right)^2}{(z_{\text{к}}+z_{\Phi})\,l_i + 2z_{AT}};$$

$$z_{AБ} = \frac{\left(z_{\text{к}} l_{12} - \frac{1}{2}\,z_{AT}\right)\left(z_{\text{к}} l_{23} + \frac{1}{2}\,z_{AT}\right)}{(z_{\text{к}}+z_{\Phi})\,l_i + 2z_{AT}};$$

$$z_{\text{т, с}\,A\,(Б)} = z_{\text{с}A\,(Б)} + (z_{\text{к}} + z_{\Phi} - 2z_h)\,L_{A\,(Б)};$$

для схемы $Б_{21}$ (рис. 4, *в*)

$$z_{A(Б)} = z_{\text{т, с}\,A\,(Б)} + \frac{1}{2}\,z_{AT} + (z_{\text{к}} - \mu z_h)\,l_{12(23)} - \frac{\left(z_{\text{к}} l_{12(23)} + \frac{1}{2}\,z_{AT}\right)^2}{(z_{\text{к}}+z_{\Phi})\,l_i + 2z_{AT}};$$

$$z_{\text{т, с}\,A(Б)} = z_{\text{с}\,A\,(Б)} + \frac{1}{4}\,(z_{\text{к}} + z_{\Phi} - 2z_h)\,L_{A\,(Б)};$$

для схем A_{21} и $Б_{21}$ значения $z_{AБ}$ одинаковы.

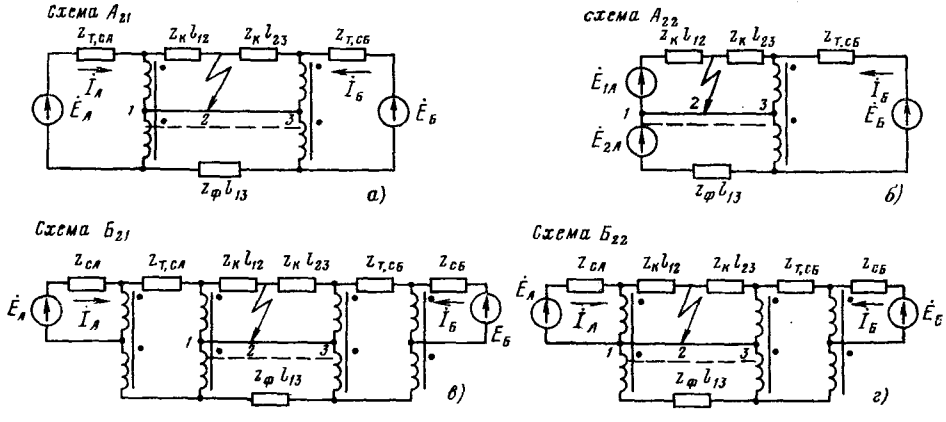


Рис. 4. Схемы замещения тяговой сети 2×25 кВ при двухстороннем питании.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Для схемы $Б_{22}$ (рис. 4, *г*)

$$z_A = z_{т,сА} + \frac{1}{4}(z_к - \mu z_h) l_{12} - \frac{(z_к l_{12})^2}{4[(z_к + z_ф) l_i + 2z_{AT}]};$$

$$z_Б = z_{т,сБ} + (z_к - \mu z_h) l_{23} - \frac{(z_к l_{23} + 0{,}5 z_{AT})^2}{(z_к + z_ф) l_i + 2z_{AT}};$$

$$z_{АБ} = \frac{z_к l_{12}(z_к l_{23} + 0{,}5 z_{AT})}{(z_к + z_ф) l_i + 2z_{AT}};$$

$$z_{т,сА} = \frac{1}{4} z_{сА}; \quad z_{т,сБ} = z_{сБ} + \frac{1}{4}(z_к + z_ф - 2z_h) L_Б.$$

В общем случае решение схемы A_{22} получается довольно громоздким, однако если принять условия $E_{A1} = E_{A2} = 0{,}5E_A$ и $|(z_к - z_ф)| l_1 < 5$, то расчетные соотношения упрощаются и имеют вид:

$$\dot{I}_{к,з} = \frac{\dot{E}_A}{2z_{к,з}} + \frac{\dot{E}_A - \dot{E}_Б}{\Delta z_{к,з}};$$

$$\dot{I}_Б = \dot{I}_{к,з} \frac{0{,}5 z_{сА} + (z_к - z_h) l_{12}}{z_{сА} + z_{сБ} + z_{т,с} L_{АБ}};$$

$$\dot{I}_з = I_{к,з} \frac{0{,}5 z_{сА} + z_к l_{12}}{z_{сА} + z_{сБ} + (z_к + z_ф) l_i},$$

где

$$z_{к.з} = 0{,}5 z_{сА} + (z_с - \mu z_h) l_{12} - \frac{[0{,}5 z_{сА} + (z_к - z_h) l_{12}]^2}{z_{сА} + z_{сБ} + z_{т,с} L_{АБ}} - \frac{(0{,}5 z_{сА} + z_к l_{12})^2}{z_{сА} + z_{AT} + (z_к + z_ф) l_1};$$

$$\Delta z_{к,з} = (z_{сА} + z_{сБ} + z_{т,с} L_{АБ}) \times \frac{[(z_{сА} + z_{AT} + (z_к + z_ф) l_1][0{,}5 z_{сА} + (z_к - \mu z_h) l_{12}] - (0{,}5 z_{сА} + z_к l_{12})^2}{[0{,}5 z_{сА} + (z_к - z_h) l_{12}][z_{сА} + z_{AT} + (z_к + z_ф) l_1]} - [0{,}5 z_{сА} + (z_к - z_h) l_{12}].$$

В заключение необходимо отметить, что приведенные формулы для расчета распределения потенциалов и средних токов в рельсовом пути, токов в элементах тяговой сети 2×25 кВ позволяют оценить электромагнитное и гальваническое влияние тяговых сетей 2×25 кВ однопутных железных дорог на линии связи и протяженные металлические коммуникации, расположенные вблизи железной дороги, рассчитать уставки токовых защит. Значение потенциалов рельсового пути дадут возможность обосновать и выбрать конструктивные параметры заземляющих устройств контактной сети и СЦБ, исследовать условия электробезопасности при обслуживании рельсовых путей и соединенных с ними устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Марквардт К. Г.** Энергоснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Трансжелдориздат, 1948.

2. **Пат. 48-9830 [Япония].** Система подвода питания к контактному проводу для электропоезда с двигателем переменного тока. Приор. от 16.02.1965, раздел 5, сб. 539, 1968.

3. **Бородулин Б. М.** Новая система энергоснабжения для участков переменного тока. — Электрическая и тепловозная тяга, 1974, № 9.

4. **Косарев Б. И., Бычков А. Н.** Расчет напряжений рельсы — земля.— Электричество, 1975, № 5.

5. **Косарев Б. И., Косолапов Г. Н., Чернов Ю. А.** Расчет токораспределения в тяговых сетях переменного тока с автотрансформаторами.— Труды МИИТ, 1974, вып. 467.

6. **Чернов Ю. А.** Схема усиления системы энергоснабжения дорог переменного тока. — Труды МИИТ, 1974, вып. 467.

7. **Косарев Б. И.** Исследование условий электробезопасности обслуживания рельсовых путей и соединенных с ними устройств при нестационарных процессах в тяговых сетях магистральных железных дорог. Автореф. дис. на соиск. учен. степени д-ра техн. наук, М., 1975. В надзаг.: М-во путей сообщ. СССР, МИИТ.

8. **Косарев Б. И.** Теория электрического расчета неоднородных и сложных тяговых сетей. — Труды МИИТ, 1972, вып. 411.

9. **Gondo Toamy.** AC Electrification with AT (Auto-Transformer) and its Consideration. — Electrick Railways, 1968, № 6.

[5.9.1977]

УДК 62-83:621.85.001.5

Исследование и оптимизация взаимосвязанных систем электропривода испытательных стендов механических трансмиссий

Доктор техн. наук **БОРЦОВ Ю. А.**, канд. техн. наук **ИВАНОВ Г. М.**, инженеры **НОВИКОВ В. Н.**, **СМОЛЬНИКОВ А. П.**, **ХМЕЛЕВ В. В.**

Известно, что рост рабочих скоростей, повышение требований к точности отработки и качеству слежения усиливают влияние упругих звеньев на динамику регулируемых, особенно тиристорных, электроприводов [Л. 1]. Достаточно полный обзор такого рода работ, содержащий к тому же практические рекомендации по оценкам влияния и способам настройки регуляторов, приведен в [Л. 2] Упругие механические связи ухудшают устойчивость атоматизированного электропривода и затрудняют получение требуемого качества переходных процессов.

Как показали экспериментальные исследования, упругие свойства испытуемой трансмиссии оказывают существенное влияние на динамику системы электропривода испытательных стендов механических трансмиссий вертолетов (ИСМТВ), состоящей из связанных упругим звеном унифицированных АСР скорости и АСР момента. Испытательные стенды должны обеспечивать воспроизведение нормальных и аварийных нагрузок, возникающих во время полета в хвостовой трансмиссии вертолета, имеющей длину более 10 м. Наличие упруго-диссипативной связи ограничивает достижение в этих

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

стендах требуемых динамических и статических характеристик процесса нагружения. Унифицированная АСР момента обеспечивает точность стабилизации момента около 5—10% вместо требуемой точности 1%, а время нарастания момента примерно 1 с вместо 0,2—0,3 с, соответствующих режиму полета.

В статье рассмотрены вопросы разработки адекватного математического описания, исследования и оптимизации динамики взаимосвязанных систем электропривода ИСМТВ с учетом упругости испытуемой трансмиссии. Особое внимание в статье уделяется способам приведения структурно-матричных моделей к виду, удобному для применения в комплексных методах исследования, оценке влияния упругости и настройкам регуляторов тока, ранее не описанных в литературе, а также выводу новых оценок взаимосвязи локальных систем регулирования. Комплексный подход, включающий в себя частотные методы, расчеты на ЦВМ и промышленный эксперимент, позволил получить новые результаты по оценке влияния упругих звеньев и настройке регуляторов взаимосвязанных систем, а также выработать и внедрить в промышленность способы электротехнической коррекции таких систем.

Рассматривается одна из наиболее перспективных систем ИСМТВ, построенная по схеме с общим якорным преобразователем (рис. 1) и состоящая из двух локальных систем: АСР скорости и АСР момента, которые взаимосвязаны через испытуемую трансмиссию и якорные цепи. Локальные системы построены как унифицированные с подчиненными контурами тока. Регуляторы момента (*РМ*), скорости (*РС*), тока (*РТ1, ТР2*) выполнены на операционных усилителях серии УБСР; АСР момента выполнена с прямым измерением упругого момента в испытуемой трансмиссии (*ИТ*) с помощью датчика момента (*ДМ*).

На рис. 2 изображена структурная схема взаимосвязанной системы электропривода ИСМТВ в относительных единицах. Переход от схемы в абсолютных единицах к схеме в относительных единицах осуществляется по методу направленного нормирования, который позволяет получить структурную модель с минимальным числом коэффициентов [Л. 3]. При изменении скорости в пределах ±5% и широких пределах изменения нагрузочного момента характеристики отдельных звеньев системы могут быть линеаризованы, поэтому структурная схема составлена для относительных отклонений переменных.

Базовые величины переменных выбраны таким образом, чтобы коэффициенты датчиков скорости, момента, а также коэффициенты внутренних обратных связей по э. д. с. двигателя $Д$ и тормоза $Т$ и коэффициенты передачи между токами и моментами $Д$ и $Т$ были равны единице. Для наглядности целесообразно сохранить на структурной схеме реальные коэффициенты передачи регуляторов *РС*, *РМ*, *РТ1* и *РТ2*, для чего базовые величины переменных $U_{РС}$, $U_{РТ1}$, $U_{ДТ1}$, $U_Т$, $U_{з.с}$ и $U_{РМ}$, $U_{РТ2}$, $U_{ДТ2}$, $U_{ДМ}$, $U_{з.м}$ считаем равными друг другу.

В качестве базовых величин скорости вращения $Д$ и $Т$ ($\omega_{Дб}$ и $\omega_{Тб}$), упругого момента в испытуемой трансмиссии ($M_{у.б}$), моментов $Д$ и $Т$ ($M_{Дб}$ и $M_{Тб}$), токов $Д$ и $Т$ ($I_{Дб}$ и $I_{Тб}$) были выбраны установившиеся значения этих переменных, соответствующие номинальной скорости вращения и номинальной нагрузке.

Структурная схема на рис. 2 характеризуется безразмерными коэффициентами и постоянными времени, а именно:

$\beta_{РС}$, $\beta_{РМ}$, $\beta_{РТ1}$, $\beta_{РТ2}$, $\tau_{РС}$, $\tau_{РМ}$, $\tau_{РТ1}$, $\tau_{РТ2}$ — динамические коэффициенты усиления и постоянные времени настройки регуляторов;

$k_{п.я}=k_{ТПя}\frac{U_{з.с.б}}{E_{п.я.б}}$, $k_{п.в}=k_{ТПв}\frac{U_{з.м.б}}{E_{п.в.б}}$ — коэффициенты передачи тиристорных преобразователей соответственно якорной цепи и обмотки возбуждения;

$k_Д=R_Д^{-1}\frac{E_{Дб}}{I_{Дб}}$, $k_Т=R_Т^{-1}\frac{E_{Дб}}{I_{Тб}}$; $k_{Т-Д}=(R_Д+R_Т)^{-1}\frac{E_{Дб}}{I_{Тб}}$ — коэффициенты передачи якорных цепей приводного $Д$ и тормозного $Т$ двигателей и цепи $Т-Д$;

$k_ф=k_в\frac{E_{п.в.б}}{E_{Дб}}$ — коэффициент передачи от э. д. с. преобразователя возбуждения до э. д. с. $Т$, учитывающий наклон характеристики намагничивания и скорость вращения; $T_в$ — электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения;

$k_{i1}=k_{ДТ1}\frac{I_{я.б}}{U_{з.с}}$, $k_{i2}=k_{ДТ2}\frac{I_{Тб}}{U_{з.м}}$ — коэффициенты передачи датчиков тока; $T_{п.я}$, $T_{п.в}$, $T_{ДТ}$, $T_{ТГ}$, $T_{ДМ}$ — постоянные времени якорного тиристорного преобразователя, преобразователя обмотки возбуждения, фильтров датчиков тока, тахогенератора и датчика момента;

$T_Д=\frac{L_Д}{R_Д}$, $T_Т=\frac{L_Т}{R_Т}$, $T_{Т-Д}=\frac{L_Д+L_Т}{R_Д+R_Т}$ — электро-

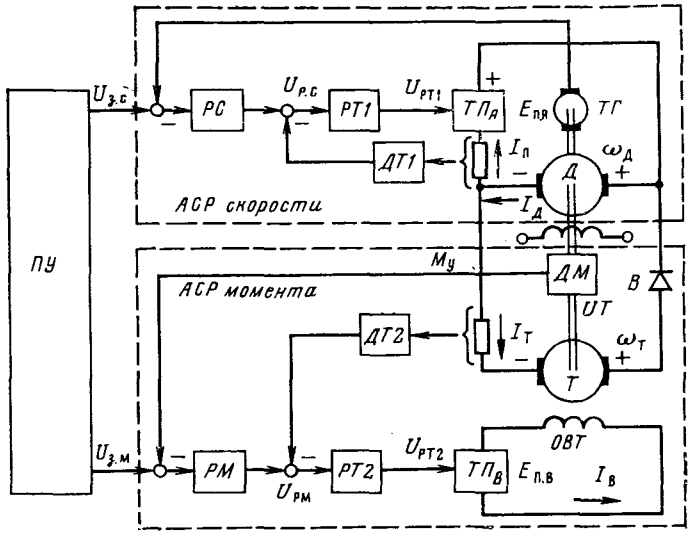


Рис. 1. Функциональная схема системы электропривода ИСМТВ.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

магнитные постоянные времени якорных цепей $Д$ и $Т$ и контура $Д-Т$ ($L_Д$, $R_Д$, $L_Т$, $R_Т$ — соответственно индуктивности и сопротивления $Д$ и $Т$);

$T_{мД}=J_Д\frac{\omega_{Дб}}{M_{у.б}}$, $T_{мТ}=J_Т\frac{\omega_{Тб}}{M_{у.б}}$ — механические постоянные времени $Д$ и $Т$ ($J_Д$, $J_Т$ — моменты инерции $Д$ и $Т$);

$T_c=\frac{1}{c}\frac{M_{у.б}}{\omega_б}$ — постоянная времени, характеризующая жесткость трансмиссии;

$T_d=k_cT_c$ — постоянная времени, характеризующая эквивалентное затухание свободных колебаний в упруго-диссипативной системе;

$\bar{r}_п=r_{п.я}\frac{I_{Дб}}{E_{Дб}}$ — относительное сопротивление якорного преобразователя.

Локальные АСР скорости и АСР момента взаимосвязаны через упруго-диссипативную испытуемую трансмиссию, которая с большой достоверностью, как показали экспериментальные исследования для ряда стендов, может быть представлена в виде двухмассовой системы с обобщенными параметрами γ, $\omega_у$, ξ, где

$\gamma=\frac{T_{мД}+T_{мТ}}{T_{мД}}=\frac{T_м}{T_{мД}}=1{,}1$ — соотношение масс;

$\omega_у=T_у^{-1}=10\div13^{-1}$ — частота собственных колебаний упругой механической системы;

$\xi=5\cdot10^{-2}\div5\cdot10^{-3}$ — эквивалентный коэффициент демпфирования.

Кроме этого, структурная схема (рис. 2) содержит естественные перекрестные связи, обусловленные взаимосвязями через якорные цепи.

Такая структурная схема имеет сложный характер взаимосвязей, поэтому необходимо привести ее к виду, более удобному для машинного анализа. Описание и преобразование исходной схемы осуществляется путем структурно-матричных преобразований. Для выделения локальных систем и передаточных функций взаимосвязи приведем обратные перекрестные связи к прямым перекрестным связям.

Упругая испытуемая трансмиссия представляет собой многосвязный объект с обратными перекрестными связями, двумя входами и тремя выходами и описывается выражением:

$$i=M(p)\bar{y}(p), \qquad (1)$$

где

$$\bar{i}(p)=[\Delta i_д(p),\ 0,\ -\Delta i_Т(p)]^т,\ \bar{y}(p)=$$
$$=[\Delta\omega_Д(p),\ \Delta M_у(p),\ \Delta\omega_Т(p)]^т;$$

$$M(p)=\begin{bmatrix} T_{мД}p & 1 & 0 \\ -1 & \frac{T_cp}{T_dp+1} & 1 \\ 0 & -1 & T_{мТ}p \end{bmatrix};$$

т — знак транспонирования.

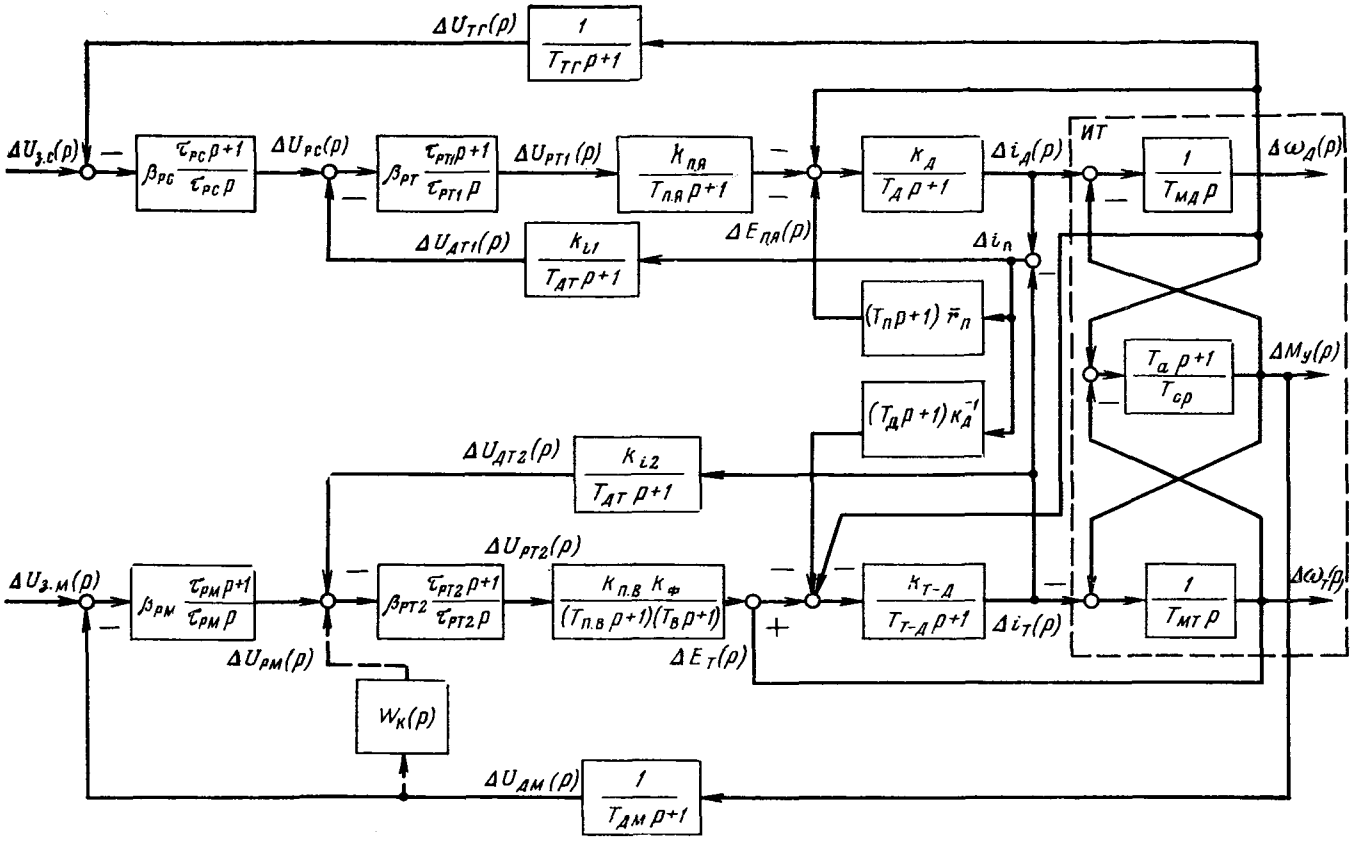


Рис. 2. Структурная схема ИСМТВ в относительных единицах.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Умножая (1) слева на матрицу $M^{-1}(p)$ [$M(p)$ — неособенная матрица], получаем выражение

$$\bar{y}(p) = M^{-1}(p)\bar{i}(p), \qquad (2)$$

которое соответствует объекту с прямыми перекрестными связями.

Для сравнительной оценки степени взаимосвязи через упругую трансмиссию и якорные цепи приведем все взаимосвязи к объекту регулирования и получим эквивалентный объект регулирования, описываемый матрицей

$$M^{э}(p) = \frac{1}{1 + R_{11}(p) R_{22}(p) L_{12}(p) L_{21}(p)} \times$$
$$\times \begin{bmatrix} \dfrac{1 + M_{22}(p) M_{33}(p) + R_{22}(p) L_{21}(p)}{|M(p)|} & \dfrac{-1 + [1 + M_{22}(p) M_{33}(p)] R_{11}(p) L_{12}(p)}{|M(p)|} \\ \dfrac{M_{33}(p) - M_{11}(p) R_{22}(p) L_{21}(p)}{|M(p)|} & \dfrac{M_{11}(p) + M_{33}(p) R_{11}(p) L_{12}(p)}{|M(p)|} \end{bmatrix}, \qquad (3)$$

где $M_{ii}(p)$ — диагональные элементы матрицы $M(p)$;

$$R_{11}(p) = W_{IД_3}(p); \quad R_{22}(p) = W_{IT_3}(p); \qquad (4)$$

$W_{IД_3}(p)$, $W_{IT_3}(p)$ — передаточные функции замкнутых токовых контуров АСР скорости и АСР момента.

Передаточные функции $L_{12}(p)$ и $L_{21}(p)$ отражают взаимосвязь через якорные цепи:

$$L_{12}(p) = \frac{k_{i1}}{T_{ДТ}p + 1}; \quad L_{21}(p) = \left[\frac{1 + M_{22}(p) M_{33}(p)}{|M(p)|} - \right.$$
$$\left. - \frac{1}{|M(p)|} + k_Д^{-1}(T_Д p + 1)\right] W_{РТ2}^{-1}(p) W_{п.в}^{-1}(p) W_{о.в}^{-1}(p). \qquad (5)$$

Если $L_{22}(p) \approx L_{21}(p) = 0$, что соответствует отсутствию взаимосвязи через якорные цепи, то элементы матрицы $M^{э}(p)$ равны соответствующим элементам матрицы $M^{-1}(p)$. Матрица $M_{э}(p)$ имеет второй порядок, так как рассматриваем только регулируемые координаты $\Delta\omega_Д(p)$ и $\Delta M_у(p)$.

Преобразованная схема показана на рис. 3.

Диагональные элементы $M^{э}_{ii}(p)$ эквивалентной матрицы $M^{э}(p)$ являются передаточными функциями объектов регулирования локальных АСР скорости и момента. Так как элементы матрицы $M^{э}(p)$ чрезвычайно сложны, то сравнение их с соответствующими элементами матрицы $M^{-1}(p)$ наиболее целесообразно осуществлять частотными методами для каждого конкретного случая. Для существующих параметров ИСМТВ (γ, $\omega_у$, ξ) сравнение показало, что элементы $M^{э}_{ii}(p)$ отличаются от соответствующих элементов матрицы $M^{-1}(p)$ только присутствием инерционного звена с малой постоянной времени $T_N \approx T_T/2$, что объясняется наличием сомножителя $N^{-1}(p) = 1 + R_{11}(p) R_{22}(p) L_{12}(p) L_{21}p$ у матрицы $M^{э}(p)$.

Таким образом, синтез локальных систем может осуществляться по диагональным элементам матрицы $M^{-1}(p)$ с учетом апериодического звена с малой постоянной времени.

В настоящее время регуляторы жестких унифицированных систем настраиваются согласно [Л. 4]. В системах электропривода с упругими связями влияние внутренних обратных связей по э. д. с. на унифицированные контуры тока становится более существенным. Получены количественные оценки влияния, которые показывают, когда при настройке токовых контуров нет необходимости учитывать влияние упругости через обратную связь по э. д. с. на динамику токового контура, т. е. это влияние остается таким же, как в жесткой системе.

Для токового контура АСР скорости дополнительное влияние обратной связи по э. д. с., обусловленное упругой связью, несущественно при $T_у^{-1} < T_Д^{-1}$

$$\frac{T_у(\gamma - 1)}{T_{эмД} 2\xi} \leqslant 1, \qquad (6)$$

где $T_{эмД} = T_м/k_Д$ — электромеханическая постоянная $Д$.

Для токового контура АСР момента должны выполняться условия:

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{T_у \gamma}{T_{эмT}(\gamma - 1) 2\xi} \leqslant 1 \quad \text{при} \quad T_у^{-1} < T_T^{-1} \\ \text{или} \\ \dfrac{T_у^2 \gamma}{T_{эмT}(\gamma - 1) 2\xi T_T} \quad \text{при} \quad T_у^{-1} > T_T^{-1}, \end{array}\right\} \qquad (7)$$

где $T_{эмT} = T_м k_T^{-1}$ — электромеханическая постоянная T.

Для ИСМТВ численные значения параметров можно принять равными: $T = 10 \div 13$ с$^{-1}$; $T_{эмД} \approx 0{,}3$ с; $T_{эмT} \approx 0{,}43$ с; $\gamma = 1{,}1$; $\xi = 5 \cdot (10^{-2} \div 10^{-3})$,

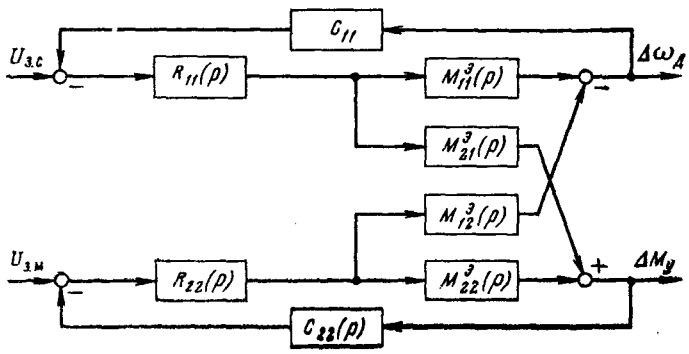


Рис. 3. Обобщенная структурная модель ИСМТВ.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

поэтому условие (6) выполняется, а условие (7) не выполняется. Настройки контура тока АСР скорости могут быть выполнены согласно [Л. 2] по рекомендациям для настройки регуляторов жестких систем. Влияние упругости проявляется в наличии «провала» на частоте упругих колебаний в логарифмической амплитудной характеристике (л.а.х.) разомкнутого контура тока и соответственно деформации фазовой характеристики. С учетом влияния упругости на объект регулирования контура тока АСР момента получим передаточную функцию разомкнутого контура тока:

$$W_{IT}(p)=\beta_{PT2}\frac{\tau_{PT2}p+1}{\tau_{PT2}p}\cdot\frac{k_{\text{п.в}}k_{\text{ф}}k_T}{(T_{\text{п.в}}p+1)(T_{\text{в}}p+1)(T_Tp+1)}\times$$

$$\times\frac{T^2_{\text{у}}p^2+2\xi T_{\text{у}}p+1}{T^2_{\text{у}}p^2+2\xi_xT_{\text{у}}p+1}\cdot\frac{k_{i2}}{T_{ДT2}p+1}, \qquad (8)$$

где $\xi_x=\xi+\frac{k_TT_{\text{у}}\gamma}{(\gamma-1)2T_{\text{м}}}$ (для $T_{\text{у}}^{-1}<T_{\text{т}}^{-1}$) определяет величину «провала» в л.а.х. разомкнутого контура тока. Для существующих параметров ИСМТВ ξ_x близко к единице. Наибольшей постоянной в токовом контуре является электромагнитная постоянная обмотки возбуждения, поэтому выбираем постоянную времени *РТ2* $\tau_{PT2}=T_{\text{в}}$. Если выбрать величину β_{PT2} такой, как в жесткой системе, то контур тока может стать неустойчивым, так как фазовая характеристика при $\omega<T_{\text{у}}^{-1}$ становится меньше, чем (—180°), поэтому выбор β_{PT2} необходимо осуществлять с учетом упругости:

$$\beta_{PT2}\leqslant\frac{2T_{\mu I}}{\Sigma T_I}\cdot\frac{M}{M+1}\beta_{PT2}^{\text{опт}}, \qquad (9)$$

где $T_{\mu I}=T_T+T_{\text{п.в}}+T_{TД2}$ — суммарная малая постоянная токового контура; $\Sigma T_I=2T_{\text{у}}+T_{\mu I}$, M — показатель колебательности; $\beta_{PT2}^{\text{опт}}$ — оптимальная настройка контура тока в АСР момента, принятая для жесткой системы.

Для рассматриваемой системы ИСМТВ рекомендуемая настройка (9) предусматривает уменьшение оптимальных значений β_{PT2} в 5—10 раз, что необходимо для получения приемлемых переходных процессов контура тока. Логарифмическая амплитудная характеристика замкнутого контура тока при настройке (9) имеет «провал» на частоте $\omega=T_{\text{у}}^{-1}$, и замкнутый контур тока аппроксимируется передаточной функцией:

$$W_{IT_3}(p)=\frac{k_{i2}^{-1}}{2\Sigma T_Ip+1}\cdot\frac{T^2_{\text{у}}p^2+2\xi T_{\text{у}}p+1}{T^2_{\text{у}}p^2+2\xi_xT_{\text{у}}p+1}. \qquad (10)$$

Объект регулирования локальной АСР момента [элемент $M^{\text{э}}{}_{22}(p)$ матрицы $M^{\text{э}}(p)$] представляет собой колебательное звено с низким коэффициентом демпфирования ξ, поэтому передаточная функция разомкнутой локальной АСР момента с учетом передаточной функции замкнутого контура тока имеет вид:

$$W_{\text{м}}(p)=W_{PM}(p)\cdot\frac{k_{i2}^{-1}}{2\Sigma T_Ip+1}\times$$

$$\times\frac{2T_{\text{у}}\xi p+1}{\gamma T^2_{\text{у}}p^2+2\xi_xT_{\text{у}}p+1}\cdot\frac{1}{(T_Np+1)(T_{ДM}p+1)}. \qquad (11)$$

Величина ξ_x может изменяться от $\xi_x=\xi$ (при отсутствии влияния упругости на токовый контур, например, при $\gamma>3$) до значения, равного единице, например, при $\gamma\approx1{,}1$ — так в этом случае «провал» замкнутого контура тока компенсирует резонансный пик на частоте $\omega\approx T_{\text{у}}^{-1}$ объекта регулирования контура момента (звено $M^{\text{э}}{}_{22}(p)$). С учетом технических требований относительно статической точности в качестве регулятора момента целесообразно применять ПИ-регулятор, который обеспечивает нулевую статическую ошибку. Постоянную времени регулятора момента выбираем равной $\tau_{PM}=2\Sigma T_I$, так как при пониженном быстродействии контура тока величина $2\Sigma T_I$ значительно больше малых постоянных контура момента. В этом случае предельная частота среза системы при заданной колебательности определяется выражением

$$\omega_{\text{с.м}}\leqslant\frac{M}{M+1}\cdot\frac{1}{\Sigma T_{i\text{м}}}\quad\text{при}\quad\xi_x\geqslant0{,}7, \qquad (12)$$

где $\Sigma T_{i\text{м}}=2T_{\text{у}}+T_{ДM}+T_N$, или

$$\omega_{\text{с.м}}\leqslant\frac{M}{M+1}T_{\text{у}}^{-1}2\xi_x\quad\text{при}\quad\xi_x<0{,}7. \qquad (13)$$

Частота среза в этом случае составляет $\omega_{\text{с.м}}=(0{,}1\div0{,}2)\,\omega_{\text{с.м}}^{\text{опт}}\leqslant2{,}5\ \text{с}^{-1}$, где $\omega_{\text{с.м}}^{\text{опт}}$ — частота среза жесткой системы. К сожалению, как показали расчеты и промышленные эксперименты, получаемое при этом время регулирования более 1 с не соответствует предъявляемым техническим требованиям к быстродействию системы регулирования момента.

Для достижения требуемого быстродействия был проведен синтез параллельной коррекции АСР момента. Сравнительный анализ возможных вариантов параллельной коррекции на АВМ выявил два общих подхода, позволяющих получить требуемое быстродействие в системах электропривода испытательных стендов:

1. При $\gamma\leqslant2\div3$. Демпфирование колебаний упругого момента через АСР момента: а) введение связи по реальной производной упругого момента $M_{\text{у}}$ на вход регулятора тока АСР момента; б) введение обратной связи по разности скоростей, эквивалентной первой производной $M_{\text{у}}$, на вход регулятора тока АСР момента.

2. При $\gamma>3$. Демпфирование колебаний $M_{\text{у}}$ через АСР скорости: а) введение обратной связи по реальной производной $\omega_{\text{д}}$ на вход регулятора тока АСР скорости; б) введение сигнала по $M_{\text{у}}$ на вход регулятора тока АСР скорости.

Влияние упругости механической связи на динамику унифицированной АСР скорости рассмотрено в [Л. 1]. При $\gamma=1{,}1$ и малой постоянной скоростного контура $T_{\mu\omega}<0{,}2T_{\text{у}}$ влияние упругости на контур скорости невелико, и настраивать регулятор скорости можно согласно [Л. 4]. При других значениях γ и $T_{\mu\omega}$ можно воспользоваться рекомендациями [Л. 1], предварительно оценив вид передаточной функции $M^{\text{э}}{}_{11}(p)$.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Выше рассмотрены настройки АСР скорости и момента как автономных систем. Существующие способы оценки «слабости» взаимосвязей либо весьма приближенны, например, по условию значительного различия частот среза локальных систем, либо требуют выполнения громоздких расчетов в случае оценки взаимосвязи по выражению

$$\|\bar{x}(t) - \bar{x}^0(t)\| \leqslant \varepsilon, \qquad (14)$$

где $\bar{x}(t)$, $\bar{x}^0(t)$ — векторы состояния системы без учета и с учетом перекрестных связей; ε — некоторое число.

Как показали исследования, у некоторых классов систем и, в частности, в системах ИСМТВ с учетом упругости максимальная степень взаимосвязи наблюдается при $\omega_{ci} \neq \omega_{c(i+1)}$, поэтому без предварительного исследования нельзя использовать оценку «слабости» взаимосвязей по условию значительного различия частот среза локальных систем.

Предлагаемый интегральный критерий взаимосвязи дает ее количественную оценку и показывает возможности рассмотрения динамики и настройки локальных систем как автономных. Качество работы двухсвязной системы описывается матрицей интегральных квадратичных оценок:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}, \qquad (15)$$

где диагональные элементы представляют собой интегральные оценки по собственным внешним воздействиям, недиагональные элементы — интегральные оценки по несобственным внешним воздействиям. Если $J_{ij(i\neq j)} \longrightarrow 0$, то при $J_{ii} \neq 0$ взаимосвязь будет слабой. Для количественной оценки степени взаимосвязи введем функцию взаимосвязи θ, которая является суммой отношений интегральных оценок по собственным и несобственным внешним воздействиям:

$$\theta = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1\ (i\neq j)}^{n} b_j \frac{J_{ji}}{J_{ii}}, \qquad (16)$$

где b_j — весовые коэффициенты.

Для двухсвязной системы

$$\theta = b_1 \frac{J_{21}}{J_{11}} + b_2 \frac{J_{12}}{J_{22}}. \qquad (17)$$

Взаимосвязанная система имеет слабые взаимосвязи, если $\theta < \varepsilon$, где ε определяется технологическими требованиями к процессу испытаний. На рис. 4 показаны кривые функции взаимосвязи в зависимости от соотношения частот среза локальных АСР скорости и момента, из которых следует, что при одинаковых требованиях к каждой из систем ($b_1 = b_2 = 0{,}5$) для получения необходимого соотношения между J_{ji} и J_{ii} требуется частоты среза систем значительно сдвигать относительно друг друга. В данном случае целесообразно уменьшать частоту среза АСР скорости, к которой в отличие от АСР момента в настоящее время не предъявляется высоких требований к быстродействию. Кривая *1* соответствует системе ИСМТВ, у которой АСР момента выполняется с коррекцией, а кривая *2* — АСР момента без коррекции. Кривая *1* проходит

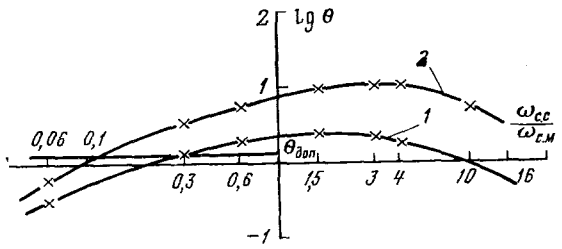


Рис. 4. Кривые функции взаимосвязи.
1 — АСРМ с коррекцией; *2* — АСРМ без коррекции.

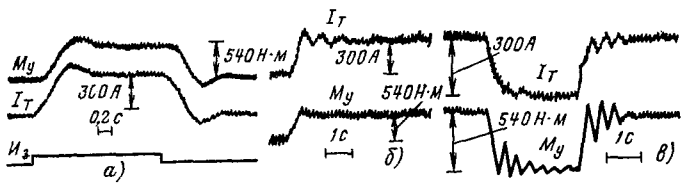


Рис. 5. Осциллограммы изменения нагрузки в промышленном ИСМТВ.
а — АСРМ без коррекции; *б*, *в* — АСРМ с коррекцией.

ниже, чем кривая *2*, что объясняется увеличением быстродействия АСР момента при введении коррекции и соответственно уменьшением интегральной ошибки выходной величины АСР момента при воздействии на вход АСР скорости.

В процессе исследования настройки локальных систем проверялись на АВМ с учетом взаимосвязи и показали, что для получения требуемого значения $\theta < \theta_{доп}$ (на рис. 4 — $\lg \theta_{доп}$) необходимо значительно уменьшить быстродействие АСР скорости по сравнению с ее предельной настройкой (в 5—6 раз). При этом АСР момента должна быть выполнена с коррекцией, так как в противном случае необходимо еще большее уменьшение β регулятора скорости.

Уточнение параметров математической модели (рис. 2) осуществлялось экспериментально на промышленном ИСМТВ. При этом параметры упруго-диссипативной трансмиссии (T_y^{-1}, ξ, γ) определялись из осциллограмм свободных колебаний упругого момента, возникающих после отключения стенда, в котором испытуемая трансмиссия была предварительно нагружена. В системе использован датчик упругого момента, описанный в [Л. 5].

Экспериментальные исследования показали, что при настройке унифицированной АСР момента по условию (12) полученное время наброса момента составило около 1 с (рис. 5,*а*). Дальнейшее увеличение $\beta_{РМ}$ приводит к автоколебаниям с частотой, близкой к частоте собственных колебаний механической части. Введение корректирующей обратной связи в виде реальной производной упругого момента с передаточной функцией $W_к(p) = \frac{\tau_к p}{\alpha \tau_к p + 1}$ на вход регулятора тока АСР момента позволило получить в производственных условиях требуемое время нарастания упругого момента примерно 0,4—0,5 с и в сочетании с ПИ-регулятором момента обеспечить необходимую статическую точность

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

стабилизации упругого момента. На рис. 5,*б* и *в* показаны переходные процессы в АСР момента при различной глубине корректирующей обратной связи. При этом осуществлялось прямое дифференцирование сигнала с датчика упругого момента на усилителе серии УБСР с параметром $\tau_к = 1{,}6-0{,}5$, значение α выбирается минимальным из условия допустимого уровня помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Динамика** автоматизированного электропривода с упругими механическими связями/ Ключев В. И., Яковлев В. И., Теличко Л. Я. и др.— Электричество, 1973, № 1, с. 40—46.

2. **Борцов Ю. А., Бычков А. И.** Обобщенные оценки влияния упругих звеньев на динамику электроприводов и настройки регуляторов унифицированных систем.— ЭП. Электропривод, 1973, № 7/24, с. 39—43.

3. **Борцов Ю. А.** Направленное нормирование структурных схем электропривода и автоматики. — Изв. вузов. Энергетика, 1972, № 9, с. 54—58.

4. **Управление** вентильными электроприводами постоянного тока/ Лебедев Е. Д., Неймарк В. Е., Пистрак М. Я., Слежановский О. В. М.: Энергия, 1970.

5. **Система** управления нагрузкой испытательного стенда трансмиссии вертолетов/ Борцов Ю. А., Иванов Г. М., Новиков В. И. и др. — ЭП. Электропривод, 1976, № 2, с. 18—20.

[10.11.1977]

УДК 62-83-52:621.3.024

Оптимальное управление динамическими процессами в электроприводах с упругими связями

ПОЛЯКОВ Л. М., ХЕРУНЦЕВ П. Э.

Одесса

Оптимизация процессов управления, в которых рабочий механизм переводится из одного состояния в другое, является одной из важнейших задач в теории и практике современного электропривода. Для систем, при анализе динамики которых возможно введение допущения об абсолютной жесткости механических передач, указанная задача может считаться в основном решенной. В [Л. 1—4 и др.] рассмотрены законы оптимального управления системами Г—Д, УРВ—Д, ТП—Д при различных сочетаниях требований к приводу и ограничений на фазовые координаты, а также принципы и методы реализации таких управлений. Наблюдающееся в настоящее время повышенное внимание к электроприводам с упругими механическими передачами, обусловленное ростом требований к качеству управления ими, вызывает необходимость определения законов оптимального управления обобщенной электромеханической системой с упругим звеном. В статье эта задача решается применительно к приводам постоянного тока, допускающим представление их в виде двухмассовой системы без зазора и управляемым при постоянном потоке возбуждения двигателя.

Система дифференциальных уравнений, описывающая динамику рассматриваемого класса приводов, записывается в виде [Л. 5—7]:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{J_1}{C_E}\frac{de_1}{dt} = C_M i_1 - m_{12} - M_{c1};\\
&\frac{1}{c_{12}}\frac{dm_{12}}{dt} = \left(\frac{e_1}{C_E} - \omega_2\right) + T_d\left(\frac{1}{C_E}\frac{de_1}{dt} - \frac{d\omega_2}{dt}\right);\\
&J_2\frac{d\omega_2}{dt} = m_{12} - M_{c2};\\
&L\frac{di_1}{dt} = u - e_1 - Ri_1.
\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Второе уравнение системы (1) можно представить в виде

$$T_y\frac{dm_{12}}{dt} = c_{12}T_y\left(\frac{e_1}{C_E} - \omega_2\right) + 2\xi\left[\frac{J_2}{J}(C_M i_1 - M_{c1}) - m_{12} + \frac{M_{c2}}{\gamma}\right], \qquad (2)$$

где $\xi = T_d/2T_y$ — определяемый экспериментально коэффициент демпфирования упругих колебаний, учитывающий действие диссипативных сил [Л. 8 и 9].

Переходя к относительным единицам (см. приложение), получаем систему уравнений:

$$\left.\begin{aligned}
&\dot{x}_1 = \frac{d\varepsilon_1}{d\vartheta} = \frac{1}{\tau_{M1}}(\mu_1 - \mu_{12} - \mu_{c1});\\
&\dot{x}_2 = \frac{d\varepsilon_2}{d\vartheta} = \frac{1}{\tau_{M2}}(\lambda_{12} - \mu_{c2});\\
&\dot{x}_3 = \frac{d\mu_{12}}{d\vartheta} = \frac{\tau_{M2}}{\gamma}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) + 2\xi\left[\frac{\tau_{M2}}{\tau_{M1}}(\mu_1 - \mu_{c1}) - \mu_{12} + \frac{\mu_{c2}}{\gamma}\right];\\
&\dot{x}_4 = \frac{d\mu_1}{d\vartheta} = \frac{1}{\tau_э}(\nu - \varepsilon_1 - \mu_1).
\end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Характер оптимальной диаграммы переходного процесса определяется критерием оптимальности. В статье рассматриваются процессы, оптимальные по быстродействию и электрическим потерям. Соответственно минимизируемые функционалы определяются выражениями:

$$I_1 = \vartheta_п = \int_0^{\vartheta_п} d\vartheta; \qquad (4)$$

$$I_2 = \zeta_п = \int_0^{\vartheta_п} \mu_1^2 d\vartheta. \qquad (5)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Представив уравнение (5) в виде

$$\dot{x}_5 = \frac{d\zeta}{d\vartheta} = \mu^2_1, \tag{6}$$

определяем функцию Гамильтона [Л. 10], соответствующую оптимизации процесса разгона по условию минимума электрических потерь:

$$H = \sum_i \dot{x}_i \psi_i = \psi_0 \mu^2_1 + \psi_1 \frac{1}{\tau_{M1}} (\mu_1 - \mu_{12} - \mu_{c1}) +$$

$$+ \psi_2 \frac{1}{\tau_{M2}} (\mu_{12} - \mu_{c2}) + \psi_3 \left[\frac{\tau_{M2}}{\gamma} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) + 2\xi \left(\frac{\tau_{M2}}{\tau_M} \mu_1 - \right.\right.$$

$$\left.\left. - \mu_{12} - \frac{\tau_{M2}}{\tau_M} \mu_{c1} + \frac{1}{\gamma} \mu_{c2} \right)\right] + \psi_4 \frac{1}{\tau_э} (\upsilon - \varepsilon_1 - \mu_1). \tag{7}$$

Здесь ψ_i — сопряженные функции, причем

$$\psi_0 < 0; \tag{8}$$

$$\frac{d\psi_i}{d\vartheta} = -\frac{\partial H}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2, \ldots \tag{9}$$

Максимум H достигается при управлении по закону

$$\vartheta = 1 \operatorname{sign} \psi_4. \tag{10}$$

Кроме того, возможно тождество $\psi_4 \equiv 0$, т. е. существование особой экстремали. Для оптимальности особой экстремали необходимо выполнение условия [Л. 11]:

$$(-1)^k \frac{\partial}{\partial \upsilon} \left[\frac{d^{(2k)}}{d\vartheta^{(2k)}} \left(\frac{\partial H}{\partial \upsilon} \right) \right] \leqslant 0, \tag{11}$$

где k — целое положительное число.

Для проверки выполнимости условия (11) запишем сопряженную систему [Л. 10 и 12]:

$$\left.\begin{aligned}
\frac{d\psi_0}{d\vartheta} &= -\frac{\partial H}{\partial \zeta} = 0; \\
\frac{d\psi_1}{d\vartheta} &= -\frac{\partial H}{\partial \varepsilon_1} = -\psi_3 \frac{\tau_{M2}}{\gamma} + \psi_4 \frac{1}{\tau_э}; \\
\frac{d\psi_2}{d\vartheta} &= -\frac{\partial H}{\partial \varepsilon_2} = \psi_3 \frac{\tau_{M2}}{\gamma}; \\
\frac{d\psi_3}{d\vartheta} &= -\frac{\partial H}{\partial \mu_{12}} = \psi_1 \frac{1}{\tau_{M1}} - \psi_2 \frac{1}{\tau_{M2}} + \psi_3 2\xi; \\
\frac{d\psi_4}{d\vartheta} &= -\frac{\partial H}{\partial \mu_1} = -\psi_0 2\mu_1 - \psi_1 \frac{1}{\tau_{M1}} - \\
&\quad - \psi_3 \frac{\tau_{M2}}{\tau_M} 2\xi\mu_1 + \psi_4 \frac{1}{\tau_э}.
\end{aligned}\right\} \tag{12}$$

Подстановкой (7) в (11) с учетом (12) получено

$$-\frac{\partial}{\partial \upsilon} \left[\frac{d^2}{d\vartheta^2} \left(\frac{\partial H}{\partial \upsilon} \right) \right] = \frac{2\psi_0}{\tau^2_э} < 0.$$

Следовательно, в данном случае выполняется необходимое условие Келли оптимальности особой экстремали ($k=1$). Достаточным условием оптимальности особой экстремали и сопряжения ее с неособой при нечетном k является наличие разрыва функции $\upsilon(\vartheta)$ в точках сопряжения [Л. 11]. В рассматриваемом случае такой разрыв имеет место. Таким образом, особая экстремаль оптимальна и сопрягается с неособой.

Закон оптимального управления на особом участке находится решением системы (12) при $\psi_4 = 0$. После несложных преобразований приходим к уравнению:

$$\frac{d^2\psi_3}{d\vartheta^2} - 2\xi \frac{d\psi_3}{d\vartheta} + \psi_3 = 0.$$

Общему решению

$$\psi_3 = [C_1 \cos(\sqrt{1-\xi^2}\vartheta) + C_2 \sin(\sqrt{1-\xi^2}\vartheta)] \exp(\xi\vartheta)$$

соответствует изменение тока якоря двигателя по закону

$$\mu_1 = \mu'_1 + M_m [\sin(\sqrt{1-\xi^2}\vartheta + \beta) \exp(\xi\vartheta) - \sin\beta],$$

где μ'_1 — значение координаты x_4 в момент $\vartheta = \vartheta'$ сопряжения участков неособого и особого управления; M_m, β — амплитуда и фаза гармонической составляющей (момента) двигателя.

Однако физически полученный закон не может быть реализован, поскольку при таком управлении в системе возникают резонансные явления, кроме того, он является расходящимся во времени ($\xi > 0$). Практический интерес представляет близкий к оптимальному закон управления, соответствующий тривиальному решению $\psi_3 = 0$, при этом на участке особого управления

$$\mu_1 = -\frac{\psi_1}{2\tau_{M1}\psi_0} = \mu_{1\zeta} = \text{const}. \tag{13}$$

Значение $\mu_{1\zeta}$ определяется координатами начальной и конечной точек фазовой траектории, а также условиями трансверсальности [Л. 12] при заданном $\vartheta_п$. Управляющее воздействие изменяется по закону

$$\upsilon = \mu_{1\zeta} + \varepsilon_1(\vartheta), \tag{14}$$

где $\varepsilon_1(\vartheta)$ находится решением системы (3) при $\mu_1 = \mu_{1\zeta}$:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon'_1 + \frac{1}{\tau_M} \left\{ (\mu_{1\zeta} - \mu_{c1} - \mu_{c2})\vartheta - \frac{\tau_{M2}}{\tau_{M1}} \times \right.$$

$$\left. \times \frac{\rho}{\sqrt{1-\xi^2}} [\sin(\sqrt{1-\xi^2}\vartheta + \psi + \delta) \exp(-\xi\vartheta) - \right.$$

$$\left. - \sin(\psi + \delta)] \right\}, \tag{15}$$

где

$$\rho = \sqrt{s^2_1 + s^2_2 - 2s_1 s_2 \cos\delta} > 0;$$

$$s_1 = \mu'_{12} \frac{\tau_M}{\tau_{M2}} - \mu_{1\zeta} + \mu_{c1} - \frac{\tau_{M1}}{\tau_{M2}} \mu_{c2};$$

$$s_2 = \tau_{M1} (\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2);$$

$$\delta = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} \right);$$

$$\psi = \arcsin \left(\frac{s_1}{\rho} \sqrt{1-\xi^2} \right);$$

ε'_1, ε'_2, μ'_{12} — координаты фазовой траектории в момент $\vartheta = \vartheta'$ сопряжения участков неособого и особого управления.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Отсчет времени в (15) ведется от начала участка особого управления.

В ряде приводов необходимо обеспечить максимальное быстродействие с учетом ограничения, накладываемого на электрические потери:

$$\zeta_{\text{п}} \leqslant \zeta_{\max}.$$

В этом случае для нахождения законов оптимального управления необходимо дополнить систему (3) уравнением (6), а также учесть условия

$$x_5(0)=0,\ x_5(\vartheta_{\text{п}})=\zeta_{\max}. \qquad (16)$$

Функция Гамильтона в этом случае записывается в виде

$$H=\psi_0+\psi_1\frac{1}{\tau_{\text{м1}}}(\mu_1-\mu_{12}-\mu_{\text{с1}})+\psi_2\frac{1}{\tau_{\text{м2}}}(\mu_{12}-\mu_{\text{с2}})+$$
$$+\psi_3\left[\frac{\tau_{\text{м2}}}{\gamma}(\varepsilon_1-\varepsilon_2)+2\xi\left(\frac{\tau_{\text{м2}}}{\tau_{\text{м}}}\mu_1-\mu_{12}-\frac{\tau_{\text{м2}}}{\tau_{\text{м}}}\mu_{\text{с1}}+\right.\right.$$
$$\left.\left.+\frac{1}{\gamma}\mu_{\text{с2}}\right)\right]+\psi_4(\upsilon-\varepsilon_1-\mu_1)+\psi_5\mu^2_1. \qquad (17)$$

На участке неособого управления напряжение изменяется по закону (10). На участке особого управления $\psi_5=0$; подстановкой (17) в (11) с учетом (9) получено

$$\frac{\partial}{\partial\upsilon}\left[\frac{d^2}{d\vartheta^2}\left(\frac{\partial H}{\partial\upsilon}\right)\right]=\frac{2\psi_5}{\tau^2_{\text{э}}}.$$

Для оптимальности особой экстремали необходимо выполнение условия $\psi_5\leqslant 0$. Решая сопряженную систему при $\psi_4=0$ и исключая из рассмотрения физически нереализуемый процесс, получаем:

$$\left.\begin{aligned}&\psi_3=0;\\ &\mu_1=-\frac{\psi_1}{2\tau_{\text{м1}}\psi_5}=\mu_{1\vartheta}=\text{const}.\end{aligned}\right\} \qquad (18)$$

Поскольку в процессе разгона $\mu_{1\vartheta}>0$, мгновенные значения функций $\psi_1(\vartheta)$ и $\psi_5(\vartheta)$ имеют различные знаки. Знак функции $\psi_1(\vartheta)$ можно определить из (13), так как изменение сопряженных координат в обоих рассмотренных случаях одинаково. Следовательно, функция $\psi_5(\vartheta)$ всегда отрицательна, и по условию Келли, особая экстремаль оптимальна и сопряжена с неособой. Значение $\mu_{1\vartheta}$ определяется координатами начальной и конечной точек фазовой траектории и условиями трансверсальности при заданном $\zeta_{\text{п}}=\zeta_{\max}$.

Приведенные выше законы оптимального управления получены без учета ограничений на скорость нарастания момента двигателя и могут быть реализованы лишь при большом коэффициенте электромеханической связи в упругой системе, что обусловливает демпфирование колебательных процессов. В системах со слабым демпфированием подача максимального напряжения может привести к возникновению чрезмерных динамических нагрузок в электроприводе [Л. 5]. Это вызывает необходимость введения ограничений на скорость изменения тока (момента) двигателя:

$$\varkappa=\frac{d\mu_1}{d\vartheta}. \qquad (19)$$

В этом случае при определении законов оптимального управления целесообразно рассматривать $\varkappa$ в качестве управляющего воздействия с учетом ограничения

$$|\varkappa|\leqslant\varkappa_{\max}.$$

Значение $\varkappa_{\max}$ выбирается из условия [Л. 5]

$$\vartheta'\geqslant 2\pi.$$

Заменив четвертое уравнение системы (3) уравнением (19), находим функции Гамильтона для случая минимизации функционалов (4) и (5):

$$H=\psi_0+\psi_1\frac{1}{\tau_{\text{м1}}}(\mu_1-\mu_{12}-\mu_{\text{с1}})+\psi_2\frac{1}{\tau_{\text{м2}}}(\mu_{12}-\mu_{\text{с2}})+$$
$$+\psi_3\left[\frac{\tau_{\text{м2}}}{\gamma}(\varepsilon_1-\varepsilon_2)+2\xi\left(\frac{\tau_{\text{м2}}}{\tau_{\text{м}}}\mu_1-\mu_{12}-\frac{\tau_{\text{м2}}}{\tau_{\text{м}}}\mu_{\text{с1}}+\right.\right.$$
$$\left.\left.+\frac{1}{\gamma}\mu_{\text{с2}}\right)\right]+\psi_4\varkappa+\psi_5\mu^2_1; \qquad (20)$$

$$H=\psi_0\mu^2_1+\psi_1\frac{1}{\tau_{\text{м1}}}(\mu_1-\mu_{12}-\mu_{\text{с1}})+\psi_2\frac{1}{\tau_{\text{м2}}}(\mu_{12}-\mu_{\text{с2}})+$$
$$+\psi_3\left[\frac{\tau_{\text{м2}}}{\gamma}(\varepsilon_1-\varepsilon_2)+2\xi\left(\frac{\tau_{\text{м2}}}{\tau_{\text{м}}}\mu_1-\mu_{12}-\frac{\tau_{\text{м2}}}{\tau_{\text{м}}}\mu_{\text{с1}}+\right.\right.$$
$$\left.\left.+\frac{1}{\gamma}\mu_{\text{с2}}\right)\right]+\psi_4\varkappa. \qquad (21)$$

В обоих случаях закон оптимального управления на участках неособого управления имеет вид:

$$\varkappa=\varkappa_{\max}\operatorname{sign}\psi_4, \qquad (22)$$

при этом напряжение управляющего преобразователя должно изменяться по закону:

$$\upsilon=\mu''_1+\varkappa(\tau_{\text{э}}+\vartheta)+\varepsilon_1(\vartheta), \qquad (23)$$

где μ''_1 — начальное значение тока на участке неособого управления.

Особые экстремали ($\psi_4=0$) оптимальны и сопрягаются с неособыми. Ток двигателя на участке особого управления постоянен, его значение определяется с учетом условий (16).

Анализируя полученные зависимости, легко убедиться, что токовые диаграммы оптимальных переходных процессов в обоих рассмотренных случаях имеют одинаковый характер и при введении ограничения на скорость изменения момента двигателя (рис. 1) полностью совпадают с рекомендациями [Л. 5], полученными на основе анализа динамических нагрузок электропривода.

Полученные результаты могут быть распространены и на случай управления процессами торможения и реверса (в общем случае — изменения скорости). При этом, однако, следует учитывать, что при значительных моментах сопротивления нелинейность нагрузки, имеющая место в процессе реверса, принципиально может привести к изменению закона оптимального управления.

Для нахождения законов оптимального управления процессом позиционирования систему (3) необходимо дополнить уравнением

$$\dot{x}_6=\frac{d\alpha}{d\vartheta}=\varepsilon_2. \qquad (24)$$

В начальной и конечной точках фазовой траектории выполняются условия:

$$x_6(0)=0,\ x_6(\vartheta_{\text{п}})=\alpha_{\text{п}}. \qquad (25)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

В случае управления по минимуму потерь функция Гамильтона записывается в виде

$$H=\psi_0\mu^2{}_1+\psi_1\frac{1}{\tau_{M1}}(\mu_1-\mu_{12}-\mu_{c1})+\psi_2\frac{1}{\tau_{M2}}(\mu_{12}-$$

$$-\mu_{c2})+\psi_3\left[\frac{\tau_{M2}}{\gamma}(\varepsilon_1-\varepsilon_2)+2\xi\left(\frac{\tau_{M2}}{\tau_M}\mu_1-\mu_{12}-\frac{\tau_{M2}}{\tau_M}\mu_{c1}+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\frac{1}{\gamma}\mu_{c2}\right)\right]+\psi_4\frac{1}{\tau_э}(\upsilon-\varepsilon_1-\mu_1)+\psi_6\varepsilon_2. \quad (26)$$

На участке неособого управления напряжение изменяется по закону (10). На участке особого управления ($\psi_4=0$) выполняется условие Келли, поскольку

$$-\frac{\partial}{\partial\upsilon}\left[\frac{d^2}{d\vartheta^2}\left(\frac{\partial H}{\partial\upsilon}\right)\right]=\frac{2\psi_0}{\tau^2_э}<0.$$

Следовательно, особая экстремаль оптимальна и сопрягается с неособой.

Подстановкой $\psi_4=0$ в сопряженную систему (9) получаем уравнение

$$\frac{d^2\psi_3}{d\vartheta^2}-2\xi\frac{d\psi_3}{d\vartheta}+\psi_3=\frac{\psi_6}{\tau_{M2}}.$$

Физически может быть реализовано управление, соответствующее частному решению:

$$\psi_3=\frac{\psi_6}{\tau_{M2}}=\text{const}.$$

Закон изменения тока двигателя на участке особого управления имеет вид

$$\mu_1=\mu'_1-a_\zeta\vartheta, \quad (27)$$

где

$$a_\zeta=-\frac{\psi_6}{2\tau_{M1}\gamma\psi_0}>0; \quad (28)$$

a_ζ — коэффициент, определяемый с учетом условий (25) при заданном $\vartheta_п$.

Управляющее напряжение на участке особого управления должно изменяться по закону:

$$\upsilon=\mu'_1-a_\zeta(\tau_э+\vartheta)+\varepsilon_1(\vartheta), \quad (29)$$

где $\varepsilon_1(\vartheta)$ определяется как решение системы (3) при $\mu_1=\mu'_1-a_\zeta\vartheta$:

$$\varepsilon_1=\varepsilon'_1+\frac{1}{\tau_M}\left\{(\mu'_1-\mu_{c1}-\mu_{c2})\vartheta-\frac{a_\zeta}{2}\vartheta^2+\right.$$

$$\left.+\frac{\tau_{M2}}{\tau_{M1}}\frac{\rho}{\sqrt{1-\xi^2}}[\sin(\sqrt{1-\xi^2}\vartheta+\psi+\delta)\exp(-\xi\vartheta)-\right.$$

$$\left.-\sin(\psi+\delta)]\right\}, \quad (30)$$

где

$$\rho=\sqrt{s^2_1+s^2_2-2s_1s_2\cos\delta}>0;$$

$$s_1=\mu'_{12}\frac{\tau_M}{\tau_{M2}}-\mu'_1+\mu_{c1}-\frac{\tau_{M1}}{\tau_{M2}}\mu_{c2};$$

$$s_2=\tau_{M1}(\varepsilon'_1-\varepsilon'_2)+a_\zeta.$$

Отсчет времени в (30) ведется от начала участка особого управления.

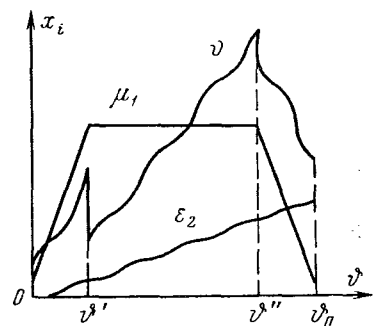


Рис. 1. Диаграмма процесса разгона привода при наличии ограничений на скорость изменения момента двигателя.

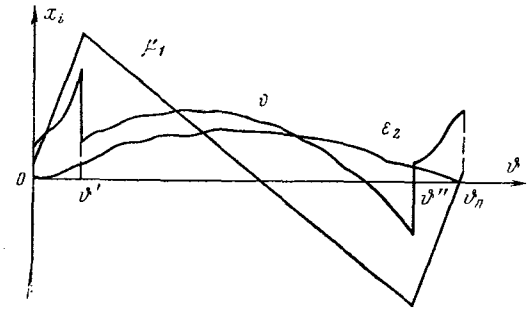


Рис. 2. Диаграмма процесса позиционирования при наличии ограничений на скорость изменения момента двигателя.

Остальные фазовые координаты на участке особого управления изменяются по законам:

$$\mu_{12}=\frac{\tau_{M2}}{\tau_M}\left[\left(\mu'_1-\mu_{c1}+\frac{\tau_{M1}}{\tau_{M2}}\mu_{c2}-a_\zeta\vartheta\right)+\right.$$

$$\left.+\frac{\rho}{\sqrt{1-\xi^2}}\sin(\sqrt{1-\xi^2}\vartheta+\psi)\exp(-\xi\vartheta)\right]; \quad (31)$$

$$\varepsilon_2=\varepsilon'_2+\frac{1}{\tau_M}\left\{(\mu'_1-\mu_{c1}-\mu_{c2})\vartheta-\frac{a_\zeta}{2}\vartheta^2-\frac{\rho}{\sqrt{1-\xi^2}}\times\right.$$

$$\left.\times[\sin(\sqrt{1-\xi^2}\vartheta+\psi+\delta)\exp(-\xi\vartheta)-\sin(\psi+\delta)]\right\}; \quad (32)$$

$$\alpha=\alpha'+\varepsilon'_2\vartheta+\frac{1}{\tau_M}\left\{(\mu'_1-\mu_{c1}-\mu_{c2})\frac{\vartheta^2}{2}+a_\zeta\frac{\vartheta^3}{6}+\right.$$

$$+\frac{\rho}{\sqrt{1-\xi^2}}[\sin(\psi+\delta)\vartheta+\sin(\sqrt{1-\xi^2}\vartheta+$$

$$\left.+\psi+2\delta)\exp(-\xi\vartheta)-\sin(\psi+2\delta)]\right\}. \quad (33)$$

При оптимизации системы позиционирования по быстродействию с учетом ограничения на значение электрических потерь система дифференциальных уравнений дополняется уравнением (6). Функция Гамильтона принимает вид:

$$H=\psi_0+\psi_1\frac{1}{\tau_{M1}}(\mu_1-\mu_{12}-\mu_{c1})+\psi_2\frac{1}{\tau_{M2}}(\mu_{12}-\mu_{c2})+$$

$$+\psi_3\left[\frac{\tau_{M2}}{\gamma}(\varepsilon_1-\varepsilon_2)+2\xi\left(\frac{\tau_{M2}}{\tau_M}\mu_1-\mu_{12}-\frac{\tau_{M2}}{\tau_M}\mu_{c1}+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\frac{1}{\gamma}\mu_{c2}\right)\right]+\psi_4\frac{1}{\tau_э}(\upsilon-\varepsilon_1-\mu_1)+\psi_5\mu^2_1+\psi_6\varepsilon_2. \quad (34)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

На участке неособого управления напряжение изменяется по закону (10). На участке особого управления

$$\mu_1 = \mu'_1 - a_\vartheta \vartheta; \tag{35}$$

$$\upsilon = \mu'_1 - a_\vartheta (\tau_э + \vartheta) + \varepsilon_1 (\vartheta), \tag{36}$$

где коэффициент

$$a_\vartheta = -\frac{\psi_6}{2\beta_1 \gamma \psi_6} > 0 \tag{37}$$

определяется по координатам начальной и конечной точек фазовой траектории с учетом (16) и (25).

Можно показать, что на участке особого управления

$$-\frac{\partial}{\partial \nu}\left[\frac{d^2}{d\vartheta^2}\left(\frac{\partial H}{\partial \nu}\right)\right] = \frac{2\psi_5}{\tau_э^2}.$$

Из (37) следует, что $\psi_5(\vartheta)$ и $\psi_6(\vartheta)$ разного знака. Согласно (28) $\psi_6 > 0$, значит, функция $\psi_5(\vartheta)$ всегда отрицательна, т. е. особая экстремаль оптимальна и сопрягается с неособой.

При наличии ограничений на скорость изменения тока (момента) двигателя управление на неособом участке должно осуществляться по закону (22). Особые экстремали в этом случае также оптимальны, ток двигателя на участке особого управления изменяется по закону (27) или (35), напряжение — по закону (29) или (36).

Сравнивая полученные законы оптимального управления процессом позиционирования (рис. 2) с результатами, приведенными в [Л. 1—4] для жестких систем, легко убедиться в однотипности оптимальных диаграмм изменения тока (момента) двигателя. Однако при наличии упругих связей управляющее напряжение в оптимальном переходном процессе должно содержать переменную составляющую, изменяемую с частотой затухающих колебаний двухмассовой упруго-диссипативной системы

$$\Omega_э = \Omega_{12}\sqrt{1-\xi^2}.$$

Реализация найденных законов оптимального управления целесообразна в высокопроизводительных упругосвязанных механизмах, работающих в напряженном режиме с частыми пусками, например, в механизмах подач металлорежущих станков, имеющих длинные кинематические цепи и узлы выборки люфта. Формирование оптимального переходного процесса может быть осуществлено на базе применения УВМ двумя способами. Первый — когда сигнал управления преобразователем формируется только УВМ; второй — когда сигнал управления формируется как сумма сигнала на выходе УВМ и сигнала обратной связи по э. д. с. двигателя. Второй способ предпочтительнее, поскольку в этом случае сигнал на выходе УВМ не будет содержать гармонических составляющих. В этом легко убедиться на основе анализа уравнений (14), (23), (29) и (36).

В заключение необходимо отметить, что полученные результаты отражают качественный характер оптимальных процессов управления электроприводами с упругими связями. Для получения количественных характеристик необходимо, кроме законов управления, знать точки сопряжения особых и неособых экстремалей. Они могут быть найдены по координатам начальной и конечной точек фазовой траектории и условиям трансверсальности численными методами.

Приложение. Условные обозначения. Абсолютные величины.

u — выходное напряжение управляющего преобразователя;

U_m — максимальное значение напряжения;

i_1 — ток двигателя, пропорциональный его моменту;

m_{12} — момент нагрузки упругого элемента;

M_{c1}, M_{c2} — моменты сопротивления на валу двигателя и механизма;

R, L — активное сопротивление и индуктивность якорной цепи;

e_1 — э. д. с. двигателя, пропорциональная частоте его вращения;

ω_2 — частота вращения механизма в двухмассовой системе;

$Q = R\int_0^t i_1^2\, dt$ — абсолютные потери;

$\varphi = \int_0^t \omega_2\, dt$ — угол поворота вала механизма;

C_E, C_M — конструктивные коэффициенты двигателя;

J_1 — момент инерции ротора двигателя и всех движущихся масс, жестко с ним связанных;

J_2 — момент инерции механизма;

$J = J_1 + J_2$ — суммарный момент инерции электромеханической системы;

$\gamma = J/J_1$ — коэффициент распределения масс;

c_{12} — эквивалентная жесткость механических передач;

$\Omega_{12} = \sqrt{c_{12}\left(\frac{J}{J_1 J_2}\right)}$ — частота свободных колебаний двухмассовой упругой системы;

$T_y = 1/\Omega_{12}$ — постоянная времени двухмассовой упругой системы;

$T_d = b_{12}/c_{12}$ — постоянная времени, характеризующая затухание свободных колебаний в двухмассовой упругой системе;

b_{12} — коэффициент демпфирования механизма;

$t_п$ — время переходного процесса;

x_i — фазовые координаты;

ψ_i — сопряженные функции.

Относительные величины:

$\upsilon = \frac{u}{U_m}$ — относительное напряжение на выходе управляющего преобразователя;

$\mu_1 = \frac{i_1}{U_m/R}$ — относительный ток (момент) двигателя;

$\mu_{12} = \frac{m_{12}}{U_m C_M/R}$ — относительный момент упругих деформаций;

μ_{c1}, μ_{c2} — относительные моменты статического сопротивления на валу двигателя и механизма;

$\varepsilon_1 = \frac{e_1}{U_m}$ — относительная э. д. с. (частота вращения) двигателя;

$\zeta = \frac{Q}{U_m^2 T_y/R}$ — относительные потери;

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

$\alpha = \frac{\varphi}{U_m T_y / C_E}$ — относительный угол поворота вала механизма;

$\varepsilon_2 = \frac{\omega_2}{U_m / C_E}$ — относительная частота вращения механизма;

$\tau_э = \frac{L/R}{T_y}$ — относительная электромагнитная постоянная времени;

$\tau_м = \tau_{м1} + \tau_{м2} = \frac{(J_1 + J_2) R}{C_E C_M T_y}$ — относительная электромеханическая постоянная времени двухмассовой системы;

$\vartheta = t/T_y$ — относительное время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пышкало В. Д., Акимов Л. В., Шамрай В. Л.** Оптимальные по быстродействию промышленные электроприводы. М.: Энергия, 1967.
2. **Чистов В. П., Бондаренко В. И., Святославский В. А.** Оптимальное управление электрическими приводами. М.: Энергия, 1968.
3. **Петров Ю. П.** Оптимальное управление электрическим приводом с учетом ограничений по нагреву. М.: Энергия, 1971.
4. **Пышкало В. Д., Рогачев А. И.** Оптимальные по потерям энергии в якоре двигателя процессы в системах управляемый выпрямитель — двигатель. Электротехника, 1972, № 9.
5. **Ключев В. И.** Ограничение динамических нагрузок электропривода. М.: Энергия, 1971.
6. **Барышников В. Д.** и др. Влияние упругости и зазоров в механических передачах на динамику секционного тиристорного электропривода быстроходной бумагоделательной машины. — ЭП. Электропривод, 1971, вып. 9.
7. **Соколовский Г. Г., Постников Ю. В.** Возможности настройки унифицированной САР скорости на предельное быстродействие при наличии упругой связи. — ЭП. Электропривод, 1973, вып. 7 (24).
8. **Динамика** автоматизированного электропривода с упругой механической связью/ Ключев В. И., Яковлев В. И., Теличко Л. Я. и др.— Электричество, 1973, № 3.
9. **Борцов Ю. А., Бычков А. И.** Обобщенные оценки влияния упругих звеньев на динамику электроприводов и настройку регуляторов унифицированных систем. — ЭП. Электропривод, 1973, вып. 7 (24).
10. **Математическая** теория оптимальных процессов/ Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. М.; Л.: Физматгиз, 1961.
11. **Габасов Р., Кириллова Ф. М.** Особые оптимальные управления. М.: Наука, 1973.
12. **Моисеев Н. И.** Элементы теории оптимальных систем. М.: Наука, 1973.

[27.12.1977]

УДК 621.313.292.001.24

Выбор параметров управляемых бесконтактных двигателей постоянного тока с беззубцовым статором

Доктор техн. наук ОВЧИННИКОВ И. Е., доктор техн. наук ЛЕБЕДЕВ Н. И., инж. ГРАЩЕНКОВ В. Т.

Ленинград

Все более широкое применение в системах автоматизированного электропривода находят бесконтактные двигатели постоянного тока. С точки зрения плавности хода и глубины регулирования интерес представляют двигатели беззубцовой конструкции, в которых обмотка статора размещена непосредственно в рабочем зазоре, а магнитопровод набран из кольцевых листов электромеханической стали. К достоинствам их могут быть отнесены: малые индуктивность обмотки и электромагнитная постоянная времени, приемлемая технологичность конструкции при большом удлинении пакета, малый уровень момента трогания и высокие энергетические показатели благодаря значительному уменьшению реактивных моментов, ликвидации зубцовых пульсаций потока и др. В то же время конструктивные особенности двигателей, заключающиеся, в частности, во внутреннем расположении системы возбуждения, выполненной в виде постоянного магнита, накладывают ограничения на быстродействие машин этого класса.

В двигателях малой мощности влияние индуктивности секций обмотки незначительно, и длительность протекания переходных процессов характеризуется с достаточной точностью электромеханической постоянной времени

$$T = J\Omega_0 / M_п, \qquad (1)$$

где J — момент инерции ротора; Ω_0 — угловая скорость идеального холостого хода; $M_п$ — статический пусковой момент.

Постоянная T может быть выражена через конструктивные параметры двигателя и магнитные параметры материала ротора. Для этого необходимо исследовать в (1) отношение скорости холостого хода к пусковому моменту. Согласно [Л. 1] это отношение равно:

$$\frac{\Omega_0}{M_п} = \frac{R}{(c_e \Phi_\delta N_a)^2}, \qquad (2)$$

где R — активное сопротивление части обмотки, подключенной к сети; c_e — коэффициент э. д. с., или равный ему коэффициент момента $c_м$; Φ_δ — рабочий поток двигателя; N_a — число активных проводников.

Выражая R через число проводников N_a, сечение меди $q_м$, среднюю длину витка $l_{ср}$ и удельное сопротивление ρ, получаем:

$$\frac{R}{N_a^2} = \frac{\rho a_л (\varepsilon + \vartheta/2)}{\pi k_з k_и \delta}, \qquad (3)$$

где $a_л$ — коэффициент, учитывающий вылет лобовых частей; ε — отношение длины активной части l_a к диаметру магнита $D_м$; ϑ — средний угловой шаг обмотки; $k_з$ — коэффициент заполнения зазора медью; $k_и$ — коэффициент использования меди, равный отношению числа одновременно обтекаемых током и участвующих в создании электромагнитного момента секций к общему числу секций двигателя (зависит только от схемы обмотки); δ — рабочий зазор.

В машинах беззубцовых конструкций наибольшее быстродействие может быть достигнуто при использовании высококоэрцитивных постоянных магнитов ротора, обладающих большими удельными энергиями, например, выполненных на основе

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

интерметаллических соединений кобальта с редкоземельными элементами [Л. 2]. Такие магниты характеризуются постоянным коэффициентом возврата, кривая размагничивания их линейна.

Полезный поток машины может быть записан в общем виде:

$$\Phi_\delta = \frac{1}{\sigma} b_{о.м} B_r Q_м, \qquad (4)$$

где $b_{о.м}$ — относительное значение индукции в магните; B_r — остаточная индукция; $Q_м$ — сечение магнита; σ — коэффициент рассеяния.

Для материалов с линейной кривой размагничивания в пренебрежении насыщением ярма статора

$$b_{о.м} = \frac{\operatorname{tg}\alpha_0}{1+\operatorname{tg}\alpha_0} = \frac{\sigma \operatorname{tg}\alpha_п}{1+\sigma\operatorname{tg}\alpha_п}, \qquad (5)$$

где $\operatorname{tg}\alpha_0$ — тангенс угла наклона луча внешней проводимости на диаграмме размагничивания; $\operatorname{tg}\alpha_п$ — тангенс угла наклона луча полезной проводимости.

Для сплошного цилиндрического магнита при числе пар полюсов $p=1$

$$\operatorname{tg}\alpha_п = \frac{1}{2}\mu_0 \frac{D_м}{\delta}\frac{H_c}{B_r}, \qquad (6)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума; H_c — коэрцитивная сила материала магнита.

Сечение магнита при тех же условиях может быть вычислено как

$$Q_м = \varepsilon D^2_м \sin\frac{\pi}{2}\xi_п, \qquad (7)$$

где $\xi_п$ — коэффициент полюсной дуги.

Подставляя (6) и (7) в (4), находим значение рабочего потока в зазоре:

$$\Phi_\delta = a_1 \frac{\varepsilon D^2_м}{\bar{\delta}+a_2} \qquad (8)$$

при

$$a_1 = \frac{1}{2}\mu_0 H_c \sin\xi_п;\ a_2 = \frac{1}{2}\mu_0\sigma\frac{H_c}{B_r}.$$

Таким образом, отношение скорости холостого хода к пусковому моменту равно:

$$\frac{\Omega_0}{M_п} = \frac{1}{c^2_e}\frac{\rho a_л(\varepsilon+\theta/2)}{\pi k_з k_и \varepsilon^2}\frac{(\bar{\delta}+a_2)^2}{a^2_1\bar{\delta}D^5_м}, \qquad (9)$$

где $\bar{\delta}=\delta/D_м$ — относительное значение рабочего зазора.

Воспользуемся выражением для момента инерции ротора

$$J = \frac{\pi}{32} k_к \gamma_р \varepsilon D^5_м, \qquad (10)$$

где $k_к$ — конструктивный коэффициент, учитывающий наличие арматуры, вала и якоря датчика положения; $\gamma_р$ — усредненная плотность ротора.

С учетом (9) и (10) электромеханическая постоянная времени вычисляется в виде

$$T = \frac{1}{32}\frac{\rho\gamma_р}{c^2_e a^2_1}\frac{k_к a_л}{k_з k_и}\frac{(\bar{\delta}+a_2)^2}{\bar{\delta}}\frac{\varepsilon+\theta/2}{\varepsilon}. \qquad (11)$$

Из (11) следует важный вывод о том, что существует вполне определенное оптимальное отношение $\bar{\delta}=\delta/D_м$, сообщающее минимум постоянной времени T. Можно также видеть, что чрезмерное увеличение относительной длины магнита вдоль расточки мало сказывается на уменьшении T. Так, при диаметральном шаге $\theta=\pi$ и $p=1$ последний член выражения (11) обращается в $1+\pi/2\varepsilon$ и при $\varepsilon=2$; 3; 4; 5; 6; 7 равен соответственно 1,785; 1,525; 1,394; 1,314; 1,26; 1,224.

Из выражения (11) обнаруживается также, что постоянная времени при фиксированном $\bar{\delta}$ практически не зависит от мощности и скорости двигателя, поскольку в диапазоне мощностей от единиц до нескольких десятков ватт значения $k_к$, $a_л$ и $k_з$ изменяются незначительно.

Оптимальное значение $\bar{\delta}$ может быть найдено минимизацией функции

$$F(\bar{\delta}) = \frac{(\bar{\delta}+a_2)^2}{\bar{\delta}}. \qquad (12)$$

Коэффициент a_2 неявно зависит от $\bar{\delta}$, поскольку коэффициент рассеяния σ изменяется с изменением $\bar{\delta}$. Действительно, $\sigma = 1+G_\sigma/G_п$, где G_σ — проводимость рассеяния; $G_п$ — полезная проводимость. С увеличением $\bar{\delta}$ полезная проводимость уменьшаетс и несколько возрастает проводимость рассеяния за счет потоков между цилиндрическими поверхностями полюсов, неполностью сцепленными со всеми витками обмотки. С учетом этих обстоятельств коэффициент рассеяния сплошного цилиндрического двухполюсного магнита можно представить приближенной зависимостью:

$$\sigma \approx 1+\frac{1}{\xi_п\varepsilon}\left(1+\frac{16}{\pi^2}\varepsilon\bar{\delta}\right)\bar{\delta}. \qquad (13)$$

Подставив выражение для a_2 в (12) с учетом (13) получим

$$F(\bar{\delta}) = \frac{[b_1+(1+b_2)\bar{\delta}+b_3\bar{\delta}^2]^2}{\bar{\delta}} \qquad (14)$$

при

$$b_1 = \frac{1}{2}\mu_0\frac{H_c}{B_r};\ b_2 = \frac{1}{2}\mu_0\frac{H_c}{B_r}\frac{1}{\xi_п\varepsilon};\ b_3 = \frac{1}{2}\mu_0\frac{H_c}{B_r}\frac{16}{\pi^2\xi_п}.$$

График функции $F(\bar{\delta})$ при различных ε для материала $\mathrm{SmCo_5}$, имеющего $B_r\approx 0{,}9$ Т и $H_c\approx 600\times 10^3$ А/м, представлен на рис. 1.

Из графика видно, что оптимальное значение относительного зазора $\bar{\delta}_{опт}$ лежит в районе 0,25, т. е. односторонний магнитный зазор должен составлять приближенно четверть диаметра магнита. Этот оптимум практически не зависит от относительной длины магнита ε. Минимум функции $F(\bar{\delta})_{min}$ для диапазона $\varepsilon=3\div5$ составляет 2,4—2,3 и также мало зависит от ε.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Таким образом, можно оценить предельные значения электромеханических постоянных по видоизмененной формуле:

$$T_{\min} = \frac{1}{32}\frac{\rho k_к \gamma_р a_л}{c^2_e a^2_1 k_з k_и} F(\bar{\delta})_{\min} \frac{\varepsilon + \theta/2}{\varepsilon}. \qquad (15)$$

Следует отметить, что экстремум функции $F(\bar{\delta})$ не является явно выраженным. Это обстоятельство может быть использовано при проектировании двигателя. Действительно, вследствие дискретного изменения диаметров обмоточного провода расчетное значение $k_з$ может оказаться выше или ниже максимально допустимого по технологическим соображениям. Некоторое увеличение или уменьшение $\bar{\delta}$ позволяет довести $k_з$ до максимального значения и повысить тем самым быстродействие машины.

Определим возможный минимум постоянной времени для трехсекционного двигателя при соединении секций обмотки звездой с коммутатором на шести силовых ключах (материал ротора $SmCo_5$) при $p=1$, выбрав предварительно наиболее реальные значения коэффициентов, входящих в (15).

Основываясь на опыте проектирования машин подобного типа, принимаем $c_e \approx 0{,}33$; $k_з \approx 0{,}4$; $a_л \approx 1{,}3$; $\varepsilon=4$; $\theta=\pi$; $k_к \approx 1{,}35$; $\rho=1{,}74\cdot10^{-8}$ Ом·м; $\gamma_р \approx 8\cdot10^3$ кг/м^3; $\xi_п \approx 0{,}7$. Приведенные значения позволяют вычислить коэффициент $a_1=0{,}336$. Коэффициент использования меди для трехсекционной обмотки с реверсивным питанием $k_и=0{,}667$. Подставив эти данным в (15), получим оценку предельного быстродействия двигателя $T_{\min} \approx 8\cdot10^{-3}$ с. Отметим, что использование трехсекционной обмотки с параллельным питанием, подключаемой к источнику посредством трехключевого коммутатора, удвоило бы это значение, поскольку коэффициент использования меди в этом случае равен 0,33.

Применение оксиднобариевого магнита, например, типа 2БА, имеющего энергетическое произведение $(BH)_{max}$ приблизительно на порядок меньше аналогичного значения для $SmCo_5$ [Л. 2] увеличивает предельное значение $T_{\min}$ также приблизительно на порядок. С достаточной точностью можно утверждать, что минимально возможное значение электромеханической постоянной времени для двигателей рассматриваемого типа (без учета различий в плотности материала ротора) обратно пропорционально значению энергетического произведения $(BH)_{max}$ материала магнита на рабочем участке прямой возврата.

В таблице приведены сравнительные данные по быстродействию машин с различными материалами ротора для чисел пар полюсов $p=1$ и 2. Параметр τ означает относительное значение $T_{\min}$, причем за базовое выбрано значение постоянной времени двигателя с индуктором из материала $SmCo_5$ при $p=1$. Для магнитов с выпуклой кривой размагничивания показатели $\bar{\delta}_{опт}$ и τ определены дважды: при стабилизации на воздухе — путем извлечения из намагничивающей установки без охранного кольца; при стабилизации током якоря. Во втором случае относительное значение продольной составляющей м. д. с. реакции якоря $h_{р.я}=F_{р.я}/F_м$ (где

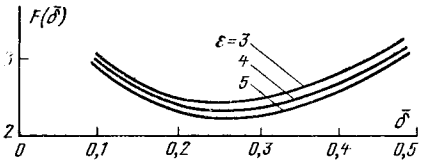


Рис. 1. График функции $F(\bar{\delta})$.

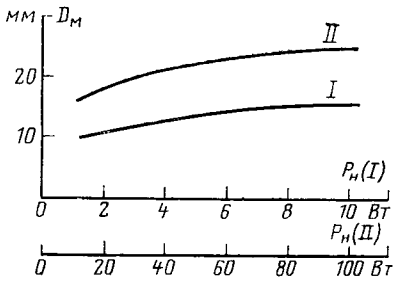


Рис. 2. Изменение необходимого диаметра магнита из материала $SmCo_5$ в зависимости от мощности двигателя при $n_н=1500$ об/мин, $\varepsilon=3$.

$F_м$ — максимальная м. д. с. магнита в точке H_c) условно принято постоянным и равным 0,1.

Из таблицы можно видеть, что при использовании наиболее мощных литых магнитов, например, ЮНДК35Т5АА, намагниченных в собранном состоянии, можно приблизиться к уровню быстродействия машины с индуктором из $SmCo_5$. Однако относительно малое значение $\bar{\delta}_{опт}$ в ряде случаев (особенно для машин мощностью до единиц ватт) затрудняет размещение обмотки в зазоре, что связано с существенным уменьшением сечения меди и допустимого коэффициента заполнения.

Дальнейший путь определения параметров, необходимых для проектирования двигателя, состоит в сопоставлении отношения скорости холостого хода к пусковому моменту, найденного из условия максимального быстродействия, с тем же отношением, вычисленным из условия получения заданной полезной мощности на валу P_2.

Безразмерное значение полезной мощности, равное $P_2/UI_п$, может быть записано в виде соотношения [Л. 3]:

$$p_2=(\mu_1-\nu_н\mu_2-\mu_c)\nu_н, \qquad (16)$$

где $(\mu_1-\nu_н\mu_2)$ — безразмерное выражение линейной механической характеристики двигателя; $\nu_н=\Omega_н/\Omega_0$ — относительное значение номинальной скорости двигателя; $\mu_c=M_c/M_п$ — относительное значение приведенного момента потерь.

Чтобы заданная мощность на валу была реализована при минимуме пускового тока или пусковой мощности, что важно с точки зрения наиболее рационального построения схемы коммутатора, а также уменьшения тепловых нагрузок в условиях стопорного режима (работа на упоре), необходимо обеспечить максимум p_2 в (16). Этот максимум до-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Тип материала	Стабилизация на воздухе				Стабилизация током якоря ($h_{р.я}$=0,1)			
	p=1		p=2		p=1		p=2	
	$\bar{\delta}_{опт}$	τ	$\bar{\delta}_{опт}$	τ	$\bar{\delta}_{опт}$	τ	$\bar{\delta}_{опт}$	τ
ЮНДК35Т5	0,26	4,5	0,15	3,1	0,16	2,4	0,09	2,5
ЮНДК35Т5АА	0,30	4,2	0,20	2,8	0,09	1,2	0,07	1,3
ЮНДК40Т8АА	0,30	2,7	0,15	2,0	0,15	1,4	0,10	1,5
ММК11	0,25	3,9	0,15	3,5	0,20	2,8	0,10	2,9
2БА1	0,34	8,3	0,22	9,1	—	—	—	—
3БА2	0,35	4,6	0,25	5,6	—	—	—	—
КС37А	0,32	1,1	0,21	1,2	—	—	—	—

стигается при значении относительной скорости

$$(\nu_н)_{опт}=\frac{\mu_1-\mu_c}{2\mu_2}, \qquad (17)$$

для которой

$$(p_2)_{max}=\frac{(\mu_1-\mu_c)^2}{4\mu_2}. \qquad (18)$$

Отсюда пусковая мощность двигателя

$$P_п=UI_п=M_п\Omega_0=\frac{P_2}{(p_2)_{max}}=\frac{4P_2\mu_2}{(\mu_1-\mu_c)^2}. \qquad (19)$$

В то же время

$$\Omega_0=\frac{\Omega_н}{(\nu_н)_{опт}}=\frac{2\Omega_н\mu_2}{\mu_1-\mu_c}. \qquad (20)$$

Разделив пусковую мощность (19) на возведенную в квадрат скорость холостого хода (20) и приравняв результат правой части выражения (9), получим:

$$\frac{\Omega_н}{P_2}\mu_2=\frac{1}{c^2_e}\frac{\rho a_л(\varepsilon+\theta/2)}{\pi k_з k_и \varepsilon^2}\frac{(\bar{\delta}+a_2)^2}{a^2_1\bar{\delta}D^5_м}, \qquad (21)$$

отсюда диаметр магнита

$$D_м=F(\bar{\delta})^{1/5}\sqrt[5]{\frac{P_2}{\Omega^2_н\mu_2}\frac{\rho a_л}{c^2_e\pi k_з k_и}\frac{(\varepsilon+\theta/2)}{a^2_1\varepsilon^2}}. \qquad (22)$$

Таким образом, условия минимума постоянной времени по минимуму функции $F(\bar{\delta})$ совпадают с условиями минимума диаметра магнита $D_м$ при фиксированном значении ε.

На рис. 2 показано изменение минимально возможного диаметра магнита, выполненного из материала $SmCo_5$, в зависимости от мощности двигателя. Построение сделано для приведенных выше значений параметров трехсекционного двигателя при ε=3; μ_2=0,915; $n_н$=1500 об/мин ($\Omega_н\approx$158 1/с). Кривая I соответствует диапазону мощностей на валу до 10 Вт, а кривая II — от 10 до 100 Вт.

В ряде случаев в качестве критерия быстродействия при проектировании управляемых двигателей используются добротность $\Delta=M_п/J$ и приемистость $П=M_п\Delta$ [Л. 4]. В соответствии с (1)

$$\Delta=\Omega_0/T;\ П=P_п/T.$$

Поскольку для машин рассматриваемого класса значение теоретического предела T_{min} не зависит от Ω_0 и $P_п$, то оказывается, что критерии T_{min}, Δ_{max} и $П_{max}$ при заданных $\Omega_н$ и $P_2(\Omega_0, P_п)$ равноценны.

После определения диаметра магнита становится возможным вычисление остальных параметров, необходимых для проектирования двигателя. Пусковой ток определяется из (19) с учетом (18), затем определяется активное сопротивление $R=U/I_п$. Далее вычисляются немагнитный зазор $\delta=\bar{\delta}D_м$, число активных проводников N_a, сечение проводника $q_м$, поток двигателя Φ_δ, выбирается высота спинки статорных кольцевых пластин. После проверки размещения обмотки в немагнитном зазоре проводится уточненный расчет магнитной цепи и рабочих характеристик двигателя.

Описанная методика выбора параметров была использована при проектировании отрезка серии управляемых бесконтактных двигателей постоянного тока ДБУ, предназначенных для следящих систем многоканальных миниатюрных регистрирующих приборов с автономным питанием. Индукторы двигателей выполнены в виде цилиндрического двухполюсного магнита из материала КС37А.

Электромеханическая постоянная времени лежит в пределах 10—13 мс, что в большинстве случаев меньше, чем у выпускаемых в настоящее время серийных асинхронных и коллекторных двигателей постоянного тока [Л. 5 и 6]. Если же учесть, что бесконтактные двигатели имеют к. п. д., сравнимый с к. п. д. коллекторных машин при существенно большем сроке службы, становится очевидной целесообразность их применения в системах автоматического регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Овчинников И. Е., Лебедев Н. И.** Бесконтактные двигатели постоянного тока автоматических устройств. Л.: Наука, 1966.
2. **Справочник** по электротехническим материалам. Под ред. Корицкого Ю. В. и др. Л.: Энергия, 1976, т. 3.
3. **Овчинников И. Е.** Коэффициент полезного действия и некоторые оптимальные параметры бесконтактного двигателя постоянного тока. — Электричество, 1966, № 12.
4. **Каган В. Г.** Электроприводы с предельным быстродействием для систем воспроизведения движений. М.: Энергия, 1975.
5. **Хрущев В. В.** Электрические микромашины переменного тока для устройств автоматики. Л.: Энергия, 1969.
6. **Микроэлектродвигатели** для систем автоматики (технический справочник). Под ред. Лодочникова Э. А., Юферова Ю. М., М.: Энергия, 1969.

[10.4.1978]

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

УДК 621.315.62.027.3.001.4

Процессы, возникающие в высоковольтном фарфоре при длительном воздействии постоянного напряжения и температуры

ВАЛЕЕВ Х. С.

Москва

Ток в высоковольтном фарфоре обусловлен щелочными ионами натрия и калия, а при температуре выше 500° — еще и ионами железа и алюминия. При этом главная роль принадлежит ионам натрия. Под воздействием постоянного электрического поля эти ионы перемещаются от анодного электрода к катоду, где они нейтрализуются и оседают у электрода и вблизи него в виде дендритов, солей и окислов на поверхности.

В результате на аноде создается истощенный щелочными ионами слой высокого сопротивления, за которым появляется слой пониженного сопротивления с избыточными щелочными ионами.

Количество выделяемого вещества определяется в соответствии с законом Фарадея $m=\frac{M}{Fz}\int_0^{\tau} Idt$, где

M — молекулярная масса носителей заряда, перенесенная током I за время t; z — валентность катиона; F — постоянная Фарадея — 96494 Кл. Экв.$^{-1}$. Количество выделившегося вещества, естественно, зависит от химического состава фарфора и температуры.

Различные марки высоковольтного фарфора содержат в своем составе 4,5—6,5% окислов щелочных металлов с приблизительным соотношением $K_2O : Na_2O = 1 \div 4$.

В высоковольтных фарфоровых изоляторах при использовании их в системе передачи энергии постоянным током в зависимости от условий эксплуатации могут происходить электролитические процессы, снижающие электромеханические параметры изоляторов. Рабочая напряженность может достигать 3 МВ/м, а температура при прямом воздействии солнечных лучей — 70°. Ориентировочные расчеты показывают, что количество электричества, проходящего через головку изолятора типа П-4,5 при 20 кВ постоянного напряжения в течение года в районе Ашхабада, может составить 16 Кл, в районе Иркутска — 3,2 Кл. За сравнительно небольшой срок характеристики изоляторов, эксплуатируемых в районах с повышенной температурой, могут ухудшаться.

Установлено, что при длительном воздействии постоянного напряжения и температуры на образцы электрофарфора (полусферической формы) их электрическая $E_{пр}$ и механическая $\sigma_р$ прочности резко снижаются [Л. 1 и 2]. Степень снижения зависит от количества прошедшего через образцы электричества и от направления полярностей длительно действовавшего и приложенного пробивного напряжений. Наибольшее снижение $E_{пр}$ имеет место в случае, когда направления поля длительного воздействия и пробоя совпадают, и наименьшее, когда полярности противоположны. Аналогичные явления обнаруживались также и при испытании линейных подвесных изоляторов [Л. 3].

Характерно, что перемена полярности последовательного воздействия постоянного напряжения у образцов, через которые прошло определенное количество электричества, приводит к быстрому пробою, сопровождающемуся разрушениями испытуемых образцов. Подобное явление — разрушение изоляторов — было отмечено также в контактной сети электрифицированной железной дороги при перемене полярности напряжения на изоляторах.

В данной статье приводятся результаты исследования электропроводности и электрической прочности высоковольтного фарфора после длительного воздействия на него постоянного напряжения, приблизительно равного 5% среднего значения пробивной напряженности, с целью выявления влияния материалов электродов на указанные характеристики. Исследования проводились на образцах с односторонней лункой диаметром 20 мм и толщиной в лунке 1,1—1,4 мм, изготовленных методом прессформовки.

В качестве электродных материалов использованы: серебро, карбонильное железо, карбонильный никель, твердый раствор окислов никеля — лития и графит, нанесенные методом вжигания, за исключением образцов с графитовым электродом. Образцы с железными и никелевыми электродами обжигались в восстановительной среде, а с серебряными — в окислительной.

При длительном воздействии постоянного напряжения происходит формовка, т. е. электролиз в сильном электрическом поле, при котором из анода в диэлектрик ннжектируются ионы, образуется широкая зона примесных состояний, по которой осуществляется проводимость. Возникшие катионные вакансии обусловливают неравномерное распределение электрического поля, при этом зависимость тока от напряжения нелинейная. На рис. 1 приведены вольт-амперные характеристики фарфоровых образцов с графитовыми С — С и серебряными Ag—Ag электродами. Вольт-амперная харак-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

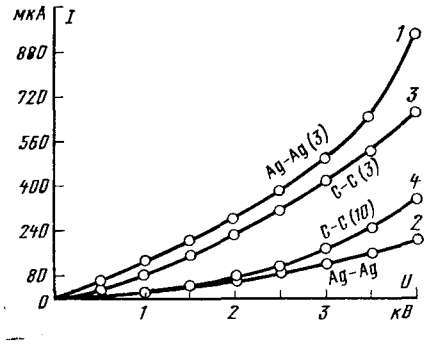


Рис. 1. Влияние длительности воздействия постоянного напряжения на вольт-амперную характеристику электрофарфора (кривые *1* и *3* — после 3 ч, *2* и *4* — после 10 ч).

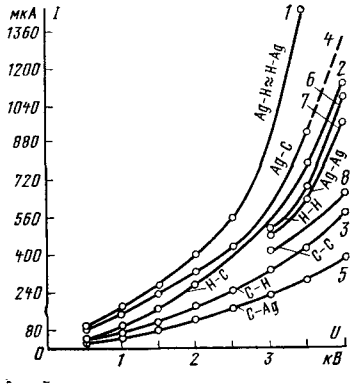


Рис. 2. Влияние материалов электродов на вольт-амперную характеристику электрофарфора после воздействия постоянного напряжения.

Ag — серебро, С — углерод, Н — твердый раствор окислов никеля и лития. Первым обозначен материал анода, вторым — катода.

теристика измерена после выдержки образцов под напряжением 2 кВ и температуре 190° в течение трех и десяти часов. До воздействия постоянного напряжения образцы имели сопротивление изоляции $1{,}6\cdot10^{12}$ и $1{,}5\cdot10^{12}$ Ом.

Из кривых рис. 1 следует, что с увеличением времени выдержки образцов под напряжением относительная величина тока существенно уменьшается, хотя характер его изменения в основном сохраняется. Наиболее резкий и нелинейный ($\beta=3{,}3$) рост тока наблюдается у образцов с серебряными электродами в интервале напряжений от 3,5 до 4 кВ. Конечное значение тока образцов с серебряными электродами становится меньше, чем у образцов с графитовыми электродами после выдержки их под напряжением в течение 10 ч.

На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики фарфоровых образцов после выдержки их под напряжением 2 кВ в течение 3 ч с использованием в качестве электродных материалов, кроме указанных выше, твердого раствора окислов никеля и лития типа $Li_{\sigma}^{+}Ni_{1-2\sigma}^{2+}Ni_{\sigma}^{3}O_{\delta}$.

Этот твердый раствор обжигом при 1100°С имеет удельное сопротивление 0,2 Ом·см условно обозначен как Н. Электродами служили как одинаковые (типа С—С; Ag—Ag; Н—Н), так и разные Ag—С; С—Ag; С—Н; Н—С; Ag—Н; Н—Ag материалы.

Из рис. 2 видно, что бóльшей нелинейностью и бóльшим значением тока при равных напряжениях обладают образцы, имеющие разные электродные материалы (кривые *1*—*5*). Образцы с разными электродными материалами, а также образцы, катоды которых выполнены из графита (Ag—С; Н—С), характеризуются бóльшей нелинейностью и бóльшим значением тока, чем при перемене материалов электродов. Исключение составляют образцы с электродами Ag—Н и Н—Ag, вольт-амперная характеристика которых не зависит от материала электродов. Следует отметить, что образцы с такими электродами часто пробиваются при выдержке под постоянным напряжением 1,6 кВ.

Длительное воздействие постоянного напряжения на образцы сопровождаются оголением графита из катодного электрода при полной его сохранности на аноде и оголением анодного серебряного электрода. В первом случае в электропроводности участвуют отрицательно заряженные частицы материала катода — ионы углерода, а во втором — материал анода — ионы серебра. Разные значения тока и степени нелинейности на образцах с графитовым катодом при перемене (С—Ag, С—Н) материала электродов характеризуют графитовый электрод как источник анионов.

Естественно, когда материалом анода служит Ag или Н (в последнем содержится 4,75% атомов лития), они также участвуют в проводимости вместе с щелочными ионами электрофарфора, увеличивая тем самым суммарный ток.

Если материал анода не является источником положительно заряженных частиц, то вблизи него образуется истощенный щелочными ионами Na^+ слой высокого сопротивления, толщина которого зависит от количества прошедшего через образец электричества. Скорость нарастания слоя составляет примерно 0,03 мм/Кл [Л. 4]. За этим слоем образуется более тонкий (приблизительно в 5 раз) слой, истощенный щелочными ионами калия. Таким образом, при длительном воздействии постоянного напряжения в теле электрофарфора между электродами образуются области с различной электропроводностью (наибольшей вблизи катода и наименьшей вблизи анода). Образование слоев с различной электропроводностью обусловливает неравномерное распределение электрического поля.

Когда в электропроводности участвуют материалы электродов, картина распределения электрического поля еще более осложняется. Катионы электродов обычно занимают вакантные места в истощенном слое и тем самым частично выравнивают электрическое поле вблизи анода. Если в электропроводности участвует и материал катода в соответствии с реакциями $M^+ + e \longrightarrow M$ (анод) и $X^- \longrightarrow X + e$ (катод), то вблизи катода образуется отрицательный объемный заряд, часть которого может принять участие в рекомбинации с положительно заряженными частицами, расположенными внутри диэлектрика. Отмечалось также участие в электропроводности ионов кислорода и газовыделение между диэлектриком и электродами [Л. 1 и 4].

Образование слоев с различной проводимостью и инжекционный ток от электродов обусловливает нелинейность вольт-амперных характеристик, как это следует из рис. 2. Это явление объясняется возникновением электронной электропроводимости в тонком истощенном слое под воздействием силь-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

ного электрического поля [Л. 4]. Изменение тока может быть выражено формулой:

$$i = \frac{2kT\sigma}{ae} \operatorname{sich} \frac{aeE}{2kT},$$

где σ — электропроводность; a — среднее расстояние между вакансиями в истощенном ионами Na^+ слое (предполагая, что ток обусловлен только ионами Na^+ и зная химический состав фарфора и его плотность, можно вычислить среднее расстояние между ионами; для электрофарфора различного состава это расстояние колеблется в пределах от 10 до 12 Å при концентрации ионов $5 \cdot 10^{20}$—$1 \cdot 10^{21}$ 1/см³); E — напряженность электрического поля; k — постоянная Больцмана; T — температура.

Явление нелинейности может быть объяснено также термополевым эффектом Френкеля — Пуля, когда возбужденные электроны в тонком истощенном слое захватываются положительными ионами в зону проводимости [Л. 5]. Зависимость тока от напряжения, приведенная на рис. 2, приблизительно соответствует формуле $i = Ae^{\alpha U}$, где U — напряжение; α и A — постоянные.

Образование истощенного щелочными ионами слоя высокого сопротивления или занятие вакантных мест в этом слое инжектированными из электрода ионами влияет не только на степень нелинейности вольт-амперной характеристики фарфора, но и на значение пробивной напряженности, особенно при перемене полярности пробивного напряжения после длительного воздействия постоянного поля.

Результаты опытов по проверке влияния материалов электродов на электрическую прочность фарфоровых образцов и условия их проведения приведены на рис. 3.

Значение $E_{пр}$ является среднеквадратичным для 20 образцов каждого вида испытаний. Предварительно образцы находились под воздействием постоянного электрического поля $E_{д.в}$. Полусферический электрод всегда находился под положительным потенциалом, а плоскость — под отрицательным. За время нахождения образцов под воздействием поля $E_{д.в}$ через каждый образец в среднем прошло $Q_{кл}$ электричества. Образцы пробиты при комнатной температуре в трансформаторном масле при скорости подъема напряжения 0,5 кВ/с.

Значения $E_{пр}$, когда полярности полей $E_{пр}$ и $E_{д.в}$ совпадают, отмечены восходящей стрелкой, в противоположном случае — нисходящей. Отрезок линии $\Delta E = E_{пр}^{\downarrow} - E_{пр}^{\uparrow}$ характеризует степень анизотропии $E_{пр}$, обусловленный, очевидно, воздействием полей внешнего и объемного экранов внутри диэлектрика. Результаты исследования показывают, что после воздействия постоянного напряжения независимо от материала электродов $E_{пр}$ снижается. Степень снижения $E_{пр}$ и анизотропия $-\Delta E$ при перемене полярности пробивного поля зависят и от материала электродов. Наибольшей анизотропией характеризуются образцы с графитовыми электродами С—С после прохождения через них 8 Кл. Почти такими же параметрами характеризуются образцы с железными Fe—Fe электродами после 13 Кл. Образцы с никелевыми электродами Ni—Ni

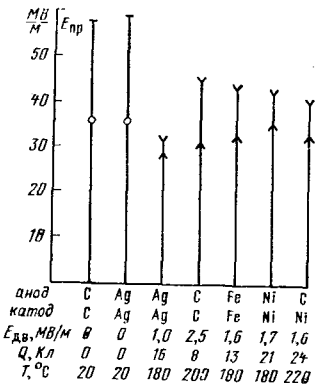


Рис. 3. Влияние материалов электродов на $E_{пр}$ электрофарфора после длительного воздействия постоянного напряжения.

$E_{д.в}$ — поле длительного воздействия; Q — количество прошедшего через образец электричества; Fe — железо; Ni — никель.

даже после прохождения через них более 20 Кл обладают повышенной $E_{пр}$ независимо от ее полярности и пониженным значением анизотропности ΔE.

Аналогичные характеристики сохраняются при использовании разных материалов в качестве электродов, например С—Ni. Пониженные значения $E_{пр}$ и ΔE у образцов с серебряными электродами объясняются, с одной стороны, уменьшением эффективной толщины образца вследствие образования проводящих дендритов, в которых содержатся, кроме щелочных ионов, атомов натрия и калия, ионы серебра, проникающие из анодного электрода, а с другой стороны, — выравниванием электрического поля вблизи анода вследствие занятия вакантных мест в истощенном слое легкоподвижными ионами серебра.

Большая анизотропия имеет место на образцах с электродами из металлического железа Fe—Fe и графита С—С. Механизм образования анизотропии в этом случае можно представить следующим образом. Под воздействием поля $E_{д.в}$ щелочные ионы Na^+ и K^+ перемещаются к катоду. Материалы анода не участвуют в электропроводности. Вблизи анода образуется истощенный щелочными ионами слой высокого сопротивления. За этим слоем располагается слой, обогащенный катионами, часть из которых у катода нейтрализуется в виде проводящего слоя или дендритов. Часть инжектированных из катода заряженных частиц оседает на дефектах и образует отрицательный объемный заряд. Когда полярности полей $E_{пр}$ и $E_{д.в}$ совпадают, эффективное поле внутри диэлектрика возрастает, и образцы пробиваются при меньшем приложенном напряжении. При перемене полярности пробивного напряжения поле $E_{д.в}$ снижает эффективное поле внутри образца, создаваемого приложенным напряжением, и пробой происходит при более высоких значениях этого напряжения.

Образцы с никелевыми электродами характеризуются пониженными значениями ΔE и повышенным $E_{пр}$, несмотря на более длительное время нахождения их под действием $E_{д.в}$. Аналогичная закономерность сохраняется и при замене на аноде никеля на графит. Такое изменение, возможно, связано с типом проводимости электродного материала вследствие частичного окисления никеля, которое может иметь место при вжигании карбонильного никеля в печи с использованием технического водорода.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Снижение $E_{пр}$ и появление анизотропии ΔE после длительного воздействия постоянного напряжения характерно, главным образом, для керамических материалов, содержащих щелочные ионы натрия. В фарфоре с соотношением щелочных окислов $K_2O:Na_2O=4$ снижение $E_{пр}$ не превышает 15%, если в электропроводности не участвует материал электродов [Л. 1]. В качестве электродов лучше использовать химически инертный материал. В частности, для высоковольтного фарфора с небольшим содержанием щелочных ионов натрия в качестве анодного электрода лучше применять материалы с электронным характером проводимости, а на катоде — с катионным характером.

Заслуживает внимания также использование в качестве электродов материала с дырочным характером проводимости. С целью предупреждения преждевременного разрушения не следует менять полярность напряжения на фарфоровых изоляторах. Разрушение изоляторов или образцов для испытания при перемене полярности происходит не в момент переключения полярности напряжения, а спустя определенный промежуток времени. Это явление связано с переменой направления движения катионов и заполнением вакантных мест в истощенном от щелочных ионов слое. Поскольку подвижность катионов мала и не превышает 10^{-10} см^2/(В·с.), занятие вакантных узлов протекает довольно медленно. По мере заполнения вакантных мест толщина истощенного слоя с высоким сопротивлением уменьшается, и на этом участке возрастает напряженность электрического поля. Благодаря этому инжекция электронов из катогда усиливается, и происходит пробой. Разрушение фарфора при пробое может происходить вследствие термоупругих или упругомеханических растягивающих напряжений. В первом случае разогрев канала пробоя и локальное термическое расширение происходит за счет джоулевого тепла, и возникающие термоупругие растягивающие напряжения могут быть оценены формулой

$$\sigma_p = \alpha E_y \left[\frac{T_0 - \theta}{2(1-\omega)\left(1+\frac{2\lambda}{R\beta}\right)} + \frac{T_0 (R_1^2 + R^2)}{2R_1^2} \right],$$

где E_y — модуль упругости; R — радиус канала; R_1 — внешний радиус образца; T_0 — температура оси канала; α — коэффициент термического расширения; μ — коэффициент Пуассона; λ — коэффициент теплопроводности; β — коэффициент теплоотдачи; θ — температура образца.

Под упруго-механическими напряжениями подразумеваются растягивающие напряжения внутри электрофарфора, возникающие в результате нейтрализации ионов натрия в канале дендрита. При нейтрализации Na^+ радиус иона увеличивается с 0,95 до 1,91 Å. Возникающее упруго-механическое напряжение, например для тонкого диска, может быть оценено следующим образом. При следующих размерах канала дендрита: $D=1\cdot10^{-4}$ см, высота $1\cdot10^{-1}$ см, объем $V_к=7{,}85\cdot10^{-10}$ см^3, в нем может находиться $n=6{,}3\cdot10^{11}$ ионов при средней концентрации ионов $5\cdot10^{21}$ 1/см^3. Число рекомбинирующих ионов $n_р$, их объем ΔV и изменение объема $\alpha \frac{\Delta V}{V_к}$ может быть оценено по соотношению $n_р=\beta n^2$. Коэффициент рекомбинации слабоподвижных ионов Na^+ с электронами $\beta=1\cdot10^{-12}$ см^3/с. В этом случае изменение объема канала при неизменной температуре $\alpha=1160\cdot10^{-6}$ 1/с, а растягивающее напряжение, возникающее в тонком диске

$$\sigma_р = \frac{(1-\mu)\alpha E_y}{2(1-2\mu)} \approx 1100 \frac{кГс}{см^2}.$$

Приведенное значение $\sigma_р$ значительно выше реального $\sigma_р$ для высоковольтного неглазурованного фарфора, которая обычно не превышает 450 кгс/см^2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Валеев Х. С., Костюков Н. С., Гаревский В. М.** Изменение электрической прочности высоковольтного фарфора при длительном воздействии высокого постоянного напряжения. — Электричество, 1963, № 1.

2. **Валеев Х. С., Красноголовый Н. К., Дроздов Н. Г.** Старение подвесных изоляторов под воздействием высокого напряжения. — Электрические станции, 1966, № 4.

3. **Валеев Х. С., Красноголовый Н. К.** О механизме старения электротехнического фарфора. — В кн.: Новое в электрокерамике. М.: Информэлектро, 1969, вып. 10.

4. **Gibson H., Ballad J. P.** Some Effects of Long Term D. C. Stress on Porcelain Insulators Operated at High Temperatures. — Jour. of Materials Science, 1972, vol. 7.

5. **Дирнлей Д., Стоухэм А., Морган Д.** Электрические явления в аморфных пленках окислов. — УФН, 1974, вып. 1.

[29.12.1977]

УДК 621.316.57.064.4

Исследования дугогасящей способности смесей элегаза с азотом и гелием для автодутьевых отключающих устройств высокого напряжения

Канд. техн. наук БРОНШТЕЙН А. М., инж. БЫКОВЕЦ Ю. Я.

ВЭИ им. В. И. Ленина

Все более широкое применение находят автодутьевые элегазовые выключатели, в которых сжатие газа для создания газового потока осуществляется самим выключателем в его поршневом устройстве в процессе отключения. Благодаря чрезвычайно простой конструкции автодутьевые выключатели почти полностью вытеснили элегазовые выключатели с двумя ступенями давления. В последних выключателях для создания гасящего потока газа в объеме высшей ступени давления содержится запас элегаза при давлениях от 1,2 до 2 МПа (12—20 кг/см^2). В процессе отключения и гашения дуги часть

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

газа из объема высшей ступени перетекает в объем низшей ступени, в которой давление элегаза обычно не превышает 0,25—0,35 МПа, т. е. перепад давлений в гасящем потоке ΔP получается четырех-шестикратным. После отключения автоматически включающийся компрессор перекачивает элегаз из объема низшей ступени в объем высшей ступени давления. Для предотвращения сжижения элегаза в объеме ступени высокого давления при температуре окружающего воздуха от 0°С и ниже газ подогревается специальными устройствами.

В автодутьевых элегазовых выключателях избыточное давление элегаза обычно не превышает 0,35—0,65 МПа, что позволяет эксплуатировать их при минимальных температурах окружающего воздуха от —40°С до —20°С без необходимости подогрева элегаза. Однако перепады давлений в гасящем потоке, создаваемые поршневым устройством, обычно не превышают трехкратной величины, что приводит к относительно низкой начальной прочности последугового промежутка и малой скорости ее нарастания в первые несколько микросекунд после перехода тока через нуль [Л. 1]. Вследствие этого элегазовые автодутьевые отключающие устройства трудно справляются с отключением токов от 30 кА и выше при начальных скоростях восстановления напряжения выше 4 кВ/мкс.

Улучшение отключающих характеристик автодутьевых отключающих устройств — весьма актуальная задача, так как современные выключатели высокого напряжения с номинальными токами отключения 31,5—63 кА в некоторых режимах отключения неудаленных коротких замыканий подвергаются воздействию восстанавливающегося напряжения с начальной скоростью 6—10 кВ/мкс.

Снижение чувствительности автодутьевого дугогасящего устройства к высоким скоростям восстановления напряжения можно обеспечить за счет таких мероприятий, как увеличение коэффициента сжатия газа в поршневом устройстве, увеличение скорости отключения или давления элегаза. Первые два мероприятия связаны с серьезными усложнениями конструкции выключателя, а увеличение давления элегаза не может дать значительного улучшения характеристик и приведет к заметному повышению предела температуры окружающего воздуха, при которой выключатель может эксплуатироваться без подогрева элегаза.

Цель настоящей статьи — показать возможность улучшения отключающих характеристик автодутьевых устройств иным путем, а именно, использованием смеси элегаза с другими газами, которые способствовали бы увеличению начальной прочности последугового промежутка и увеличению начальной скорости нарастания этой прочности. Было решено исследовать смесь элегаза с азотом SF_6+N_2 и гелием SF_6+He, так как эти газы химически инертны и не образуют побочных продуктов при воздействии высокой температуры дуги.

Прежде чем начать исследования отключающей способности смесей этих газов, были проведены некоторые сравнительные исследования характеристик дуги, обдуваемой чистыми газами. Такие исследования проводились на макете с двумя ступенями давления и отключающим устройством одностороннего дутья; диаметр сопла 14 мм, ход контактов 15 мм. В области выхлопа отработавших газов поддерживалось постоянное абсолютное давление 0,1 МПа, а перепад давлений в гасящем потоке $\Delta P=0{,}2$ МПа. Выбранный перепад давлений в гасящем потоке близок к перепадам, характерным для автодутьевых устройств. Имеющиеся публикации по отключающей способности различных газов и их смесей, как правило, относятся к исследованиям с большими перепадами давлений в гасящем потоке [Л. 2—4], поэтому их использование для условий, имеющих место в автодутьевых устройствах, затруднено. В большинстве опытов использовались графитовые контакты, чтобы исключить влияние паров металла на характеристики дуги. Исследования проводились при синусоидальном токе промышленной частоты 50 Гц с амплитудой 3000 А, возвращающееся напряжение было равно 6 кВ.

На рис. 1,*а* — *в* приведены три типичные осциллограммы отключения тока в SF_6, N_2 и He соответственно. Первые две осциллограммы иллюстрируют обычный ход процесса отключения, отличающийся только тем, что в SF_6 дуга погасла за 12 мс, а в N_2 — за 23 мс, что подтверждает лучшую деионизирующую способность SF_6. Процесс гашения дуги в He имеет совершенно необычный вид. Дуга погасла при втором переходе тока через нуль примерно через 12 мс после размыкания контактов, что подтверждает хорошую деионизирующую способность He, которую следовало ожидать из-за высокой его теплопроводности. По окончании гашения дуги нормально завершился переходный процесс восстановления напряжения, но через $t_1=1{,}15$ мс при мгновенном значении напряжения 10,5 кВ промежуток между контактами пробился и снова зажглась дуга. При очередном переходе тока через нуль снова восстановилось напряжение, но через $t_2=1{,}94$ мс при мгновенном значении напряжения 10 кВ промежуток снова пробился. Повторные пробои ($t_3=2{,}32$ мс, $t_4=3{,}53$ мс) продолжались до тех пор, пока напряжение не было отключено защитным выключателем. Эти исследования показали, что He обладает деионизирующей способностью даже лучшей, чем SF_6, но его электрическая прочность при длительном приложении напряжения очень низка.

По полученным осциллограммам были измерены напряжения пиков гашения, значения которых характеризуют нижний предел электрической прочности дугового промежутка непосредственно в момент перехода тока через нуль:

Дугогасящая среда	SF_6	N_2	He	SF_6+He (парц. давления 1:1)
Средний из 5 опытов пик гашения, В	222,6	520	580	305
Относительная начальная электрическая прочность дугового промежутка	1	2,2	2,56	1,34

Из полученных результатов вытекает, что наивысшую начальную прочность и наилучшую деионизирующую способность обеспечивает He. Поэтому можно ожидать, что добавка He к SF_6 повысит начальную прочность дугового промежутка и увеличит скорость роста этой прочности во время переходного процесса восстановления напряжения, а необходимую электрическую прочность при установившемся напряжении возьмет на себя в основном SF_6.

Обработка осциллограмм позволила также построить вольт-амперные характеристики дуги в различных газовых средах на спадающей части полуволны тока перед последним переходом тока через нуль (рис. 2).

Для построения вольт-амперных характеристик в области небольших мгновенных значений тока, кроме осциллограмм рис. 1, снимались осциллограммы тока и напряжения на дуге вблизи перехода тока через нуль с большой разверткой процесса во времени. Типичные осциллограммы показаны на рис. 3,*а* и *б*. Для снятия этих осциллограмм использовались катодный осциллограф «с памятью» С8—11 и специальные схемы с ограничителями выходных сигналов, позволявшие регистрировать в приемлемых масштабах напряжения порядка нескольких сот вольт и токи порядка десятков ампер при наивысших значениях входных сигналов 10 000 В и 3000 А.

Как видно из кривых рис. 2, напряжения на дугах в разных газах устанавливаются в следующей уменьшающейся последовательности: N_2, He, SF_6+He и SF_6. Здесь важно отметить, что хотя добавка He и повышает напряжение на дуге по сравнению с напряжением на дуге в чистом SF_6, однако вид этого повышения имеет благоприятный характер, поскольку оно минимально при больших мгновенных значениях тока и увеличивается при малых мгновенных значениях тока. Это обеспечивает малый прирост, выделяющийся в дугогасящей камере энергии и слабо влияет на износ элементов дугогасящего устройства.

Из приведенных данных можно сделать вывод, что для автодутьевых устройств бо́льшие преимущества дает смесь SF_6+He. Чтобы получить более обоснованные данные для выбора газовой смеси, были проделаны сравнительные опыты на макете автодутьевого дугогасительного устройства с небольшой мощностью отключения при возвращающемся напряжении 24 кВ. Сначала макет был заполнен элегазом до абсолютного давления 0,2 МПа (2 кг/см² при 20°С). При указанных условиях предельный ток отключения составлял 4000 А. Затем давление в макете за счет добавки гелия было поднято до 0,4 МПа и до 0,6 МПа, что привело к увеличению отключаемого тока до 5000 и 6000 А соответственно. Когда же к первоначальному давлению элегаза 0,2 МПа был добавлен азот в таком количестве, что общее давление в макете стало равным 0,6 МПа, первоначальная отключающая способность не только не повысилась, но резко упала. По-видимому, при небольших давлениях элегаза и высоких кратностях содержания азота в смеси эффект увеличения отключающей способности не достигается. В связи с этим дальнейшие исследования со смесями SF_6+N_2 были прекращены, а исследования со смесями SF_6+He продолжены.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

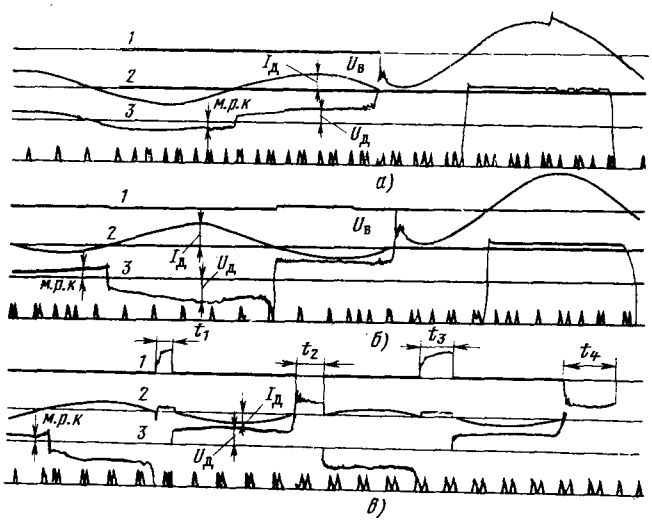


Рис. 1. Типичные осциллограммы процесса отключения в различных газах *а* — SF_6; *б* — азот; *в* — гелий;
1 — восстанавливающее напряжение; *2* — ток в цепи; *3* — напряжение на дуге.

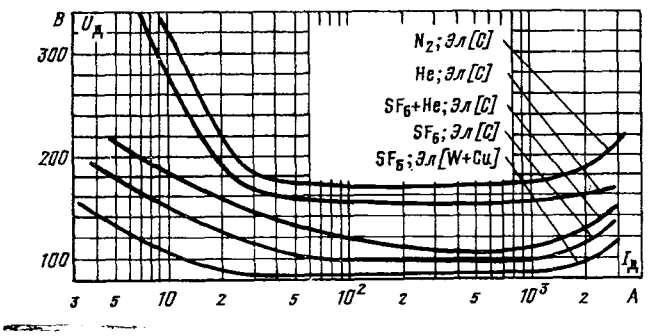


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики дуги отключения в различных газах (ΔP=0,2 МПа).

Представляло интерес проследить, как именно добавка He влияет на поведение дуги. На рис. 4 приведены копии фотограмм дуг в He, SF_6 и SF_6+He, полученные методом непрерывной развертки с помощью скоростной кинокамеры типа СФР в области мгновенных значений токов 1000—320 А.

Светящийся диаметр столба дуги в SF_6 монотонно уменьшается с уменьшением мгновенного значения тока. В смеси SF_6+He (отношение 1 : 1 по объему) на диаметре столба дуги появляются всплески, накладывающиеся на монотонно убывающий с током диаметр столба дуги. Наконец, на диаметре дуги в чистом He появляются регулярные с большой частотой (10—20 кГц) всплески. По-видимому, эти всплески вызываются повышенной вихревой конвекцией, что, в свою очередь, приводит к повышенному отводу энергии из столба дуги и уменьшению диаметра дуги вблизи перехода тока через нуль. Так, по ориентировочным оценкам отводимая от дуги мощность при токе 10 А в He составляет 3940 Вт и в SF_6 — 2484 Вт. Изменение светящихся диаметров дуг в разных средах с изменением мгновенного значения тока показано на рис. 5. Как видно из рис. 5, при малых мгновенных значениях тока примерно 10 А значения диаметров дуг в разных средах располагаются в убывающей последовательности: SF_6, SF_6+He, He. Соответственно в нарастающей последовательности располагаются скорости роста сопротивления дуг (см. таблицу), вычисленные из вольт-амперных характеристик рис. 2.

Из данных таблицы видно, что при мгновенном значении тока 7,75 А скорость роста сопротивления дуги в SF_6+He составляет 160% скорости роста сопротивления в чистом SF_6, причем наблюдается тенденция к увеличению этого соотношения по мере уменьшения мгновенного значения тока.

Полученные соотношения верны, конечно, только для данных условий опыта, но они безусловно подтверждают целесо-

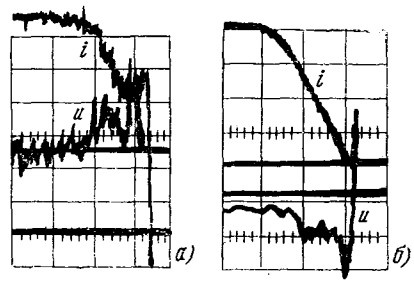
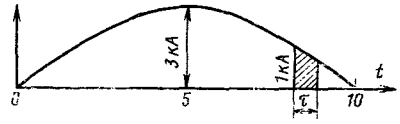


Рис. 3. Типичные осциллограммы тока и напряжения вблизи перехода тока в дуге через нуль.
а — азот; *б* — SF_6; *i* — ток в цепи; *u* — напряжение на дуге. Масштаб по току 16 А/дел.; масштаб по напряжению 100 В/дел.; развертка 50 мкс/дел. (в случае *а*) и 25 мкс/дел. (в случае *б*).



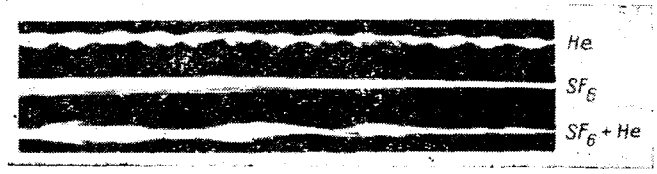


Рис. 4. Фоторазвертка участка поперечного сечения дуги в гелии, элегазе, смеси SF_6+He.

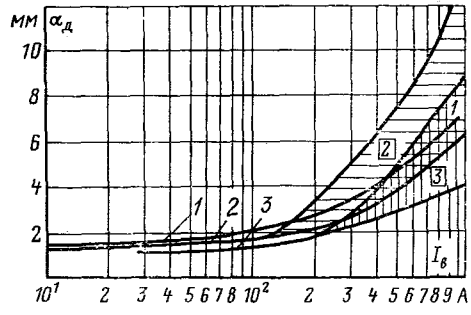


Рис. 5. Зависимость диаметров дуги в SF_6, He и смеси SF_6+He от мгновенного значения тока.
1 — SF_6; *2* — SF_6+He; *3* — He.

Дугогасящая среда	Скорость роста сопротивления столба дуги (Ом/мкс) при следующих мгновенных значениях тока (А)		
	11	9,5	7,75
SF_6	1,5	2,2	3,4
SF_6+He	1,8	2,5	5,4
He	3	5,3	8

образность использования смеси SF_6+He для улучшения характеристик автодутьевых элегазовых выключателей и, в частности, для уменьшения их чувствительности к высоким скоростям восстановления напряжения. Чтобы подтвердить это заключение, были проведены сравнительные исследования зависимости отключаемого тока от средней скорости восстановления напряжения на реальном образце автодутьевого элегазового выключателя, резервуар которого в одной серии опытов был заполнен элегазом до избыточного давления 0,2 МПа

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

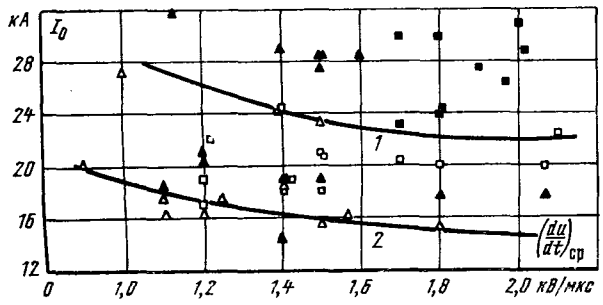


Рис. 6. Зависимость тока отключения от средней скорости восстановления напряжения.

1 — SF_6+He; *2* — SF_6; □ — успешное отключение (SF_6+He); ▪ — неуспешное отключение (SF_6+He); △ — успешное отключение (SF_6); ▲ — неуспешное отключение (SF_6). Неуспешным отключением считается такое, при котором длительность горения дуги больше 0,025 с (более 2,5 полупериодов); при успешном отключении длительность горения дуги не превышает 0,02 с (2 полупериода).

(при 20°С), а во второй серии опытов давление в резервуаре выключателя было повышено до 0,4 МПа путем добавления соответствующего количества гелия. В этих опытах давление элегаза было снижено по сравнению с номинальным давлением данного выключателя (номинальное избыточное давление элегаза 0,45 МПа), а также снижена предписанная ему скорость отключения, что позволило проиллюстрировать влияние добавки гелия при нормальных параметрах токов отключения и скоростей восстановления напряжения использованного испытательного стенда.

На рис. 6 приведены результаты этих сравнительных исследований. Кривые *1* и *2* проведены по границам областей уверенных успешных отключений и начала появления неуспешных отключений. Как видно из приведенных данных, при скорости восстановления напряжения 1,2 кВ/мкс добавка гелия позволяет увеличить ток отключения приблизительно с 18,5 до 26,8 кА, а при 2 кВ/мкс — приблизительно с 15,4 до 22,4 кА, т. е. добавка гелия увеличила предельный ток отключения в 1,5—1,6 раза и уменьшила чувствительность дугогасящего устройства к скорости восстановления напряжения.

Таким образом, применение в автодутьевых выключателях смеси элегаза с гелием обеспечивает высокую отключающую способность при повышенных скоростях восстановления напряжения и одновременно создает возможность эксплуатации выключателя без подогрева газа при низких температурах окружающего воздуха.

Результаты исследований позволили рекомендовать [Л. 5] применение смесей «элегаз — гелий» в автодутьевых выключателях для улучшения их отключающей способности и эксплуатационных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Исследования** отключающей способности элегазового автопневматического дугогасительного устройства/ Бронштейн А. М., Горцуинян Э. В. Пантелеймонова И. И., Позднякова К. А. — Электротехника, 1975, № 6.

2. **Morita Todashi.** Analysis of Interrupting Characteristics of Compressed Gas (SF_6, air) Blast Circuit Breaker, Part I.— Fuji Elec. J., 1975, vol. 48, № 9.

3. **Garson R. D.** The Effect of SF_6—N_2 Mixture Upon the Recovery Voltage Capability of a Synchronouse Interrupter. — IEEE Trans., 1976, PAS 95, № 1.

4. **Nishikawa H., Okazaki T., Yamashita S.** Arc Extinction Performance of SF_6 Gas Blast Interrupter. — IEEE Trans., 1976, PAS 95, № 6.

5. **А. с. 584353** (СССР). Газовая смесь для выключателей высокого напряжения/ Бронштейн А. М., Быковец Ю. Я. Опубл. в Б. И., 1977, № 46.

[1.6.1978]

УДК 621.316.064.43

Отключающая способность межконтактного промежутка синхронизированного взрывного дугогасящего устройства

КОРОЛЬКОВ В. Л., ФУРСА О. И.

Томск

Увеличение токов короткого замыкания (к. з.) до сотен килоампер требует создания отключающих аппаратов с повышенной коммутационной способностью. Известно, что одним из путей решения данной задачи является создание синхронизированных выключателей [Л. 1]. Идеальный синхронизированный выключатель должен в момент перехода тока через нуль разомкнуть контакты и образовать промежуток с достаточной электрической прочностью. Для выполнения этих условий реальному выключателю необходимы сверхбыстродействующий привод и способность мгновенно восстановить изоляционные характеристики промежутка. Поэтому естественным представляется применение в синхронизированных выключателях, предназначенных для отключения сильноточных высоковольтных сетей, энергии взрыва взрывчатого вещества (ВВ). Взрыв заряда, например, массой 3—5 г развивает громадную мощность, которая позволяет разорвать токовод сечением 300 мм² и за 0,18 мс образовать в нем промежуток 45 мм. Причем подрыв заряда можно осуществить в заданный момент времени с точностью до $5 \cdot 10^{-5}$.

Взрыв ВВ сопровождается выделением большого количества газообразных продуктов детонации, которые создают в зоне промежутка высокое до 10^9 Па давление, что способствует быстрой деионизации остаточного ствола дуги и обеспечивает высокую скорость нарастания электрической прочности промежутка.

Изоляционные характеристики межконтактного промежутка зависят от его размеров, однако с увеличением расстояния, на которое должны разойтись контакты, возрастает необходимое на это время, а следовательно, и количество энергии, выделяющейся в дуге, что затрудняет ее деионизацию. Для оптимизации процесса отключения необходимо установить зависимость отключающей способности межконтактного промежутка от времени упреждения взрывом нуля тока, которое исчисляется от момента подрыва заряда ВВ до момента перехода отключаемого тока через нуль.

Исследования проводились на макете синхронизированного взрывного дугогасящего устройства (СВДУ), имитировавшем реальную конструкцию с момента образования межконтактного промежутка конечных размеров. Схематично он представлен на рис. 1 и состоит из: *1* — корпуса; *2* — стеклянного баллона с воздухом; *3* — наполнителя (трансформаторного масла); *4* — токопроводящих электродов (стальных); *5* — проволочки; *6* — заряда ВВ. Работа СВДУ: при подаче напряжения на токовод макета в промежутке между электродами, размеры которого заранее установлены, загорается электрическая дуга; в заданный момент времени перед нулем тока от схемы синхронизации поступает сигнал на подрыв заряда ВВ.

В известных конструкциях взрывных выключателей [Л. 2] на дугу отключения действуют непосредственно продукты взрыва, имеющие температуру 3000—5000°, что в значительной степени ограничивает теплоотвод и снижает коммутационную способность. В рассматриваемой конструкции дуга отделена от продуктов взрыва слоем трансформаторного масла —

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

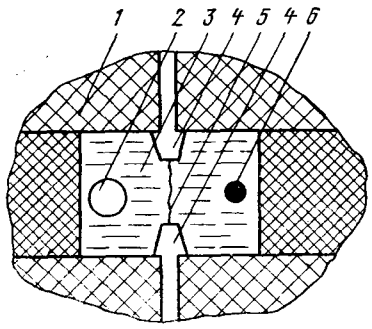


Рис. 1. Макет синхронизированного взрывного дугогасящего устройства.

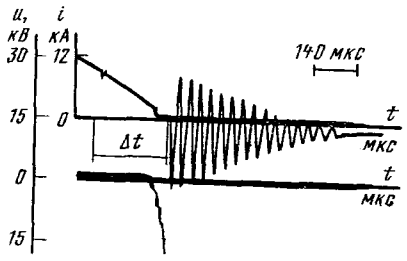


Рис. 2. Осциллограмма отключения тока СВДУ (Δt — время упреждения взрывом нуля тока).

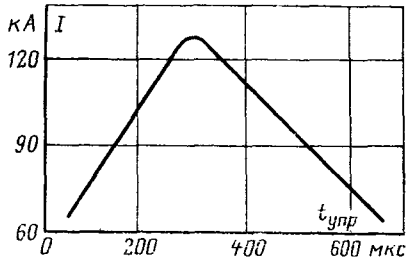


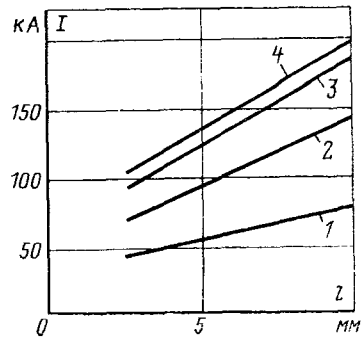
Рис. 3. Зависимость отключающей способности от времени упреждения взрывом нуля тока при промежутке 5 мм и расстоянии до заряда ВВ 25 мм.

известной дугогасящей среды, находящейся после взрыва под высоким давлением, которое способствует быстрому распаду остаточного ствола дуги и обеспечивает высокую скорость нарастания электрической прочности промежутка. Отключался генератор импульсных токов, работающий в периодическом режиме с параметрами $C=360$ мкФ, $L=360$ мкГн. Максимальное зарядное напряжение равнялось 31 кВ, а частота восстанавливающегося напряжения составляла 35 кГц. На основании равенства производных в области перехода тока через нуль имитировался режим к. з. с амплитудным значением первой полуволны до 276 кА при напряжении 19 кВ частоты 50 Гц [Л. 3]. Время упреждения взрывом нуля тока регулировалось схемой задержки в пределах 0—600 мкс.

Для отключения использовался взрыв заряда вторичного ВВ (не чувствительного к внешним воздействиям: удару, трению и т. д.) массой 1,5 г. На рис. 2 приведена типичная осциллограмма отключения тока СВДУ, на которой зафиксирована часть первой полуволны тока при подходе его к нулю, момент подрыва заряда, восстанавливающееся и установившееся напряжения.

На рис. 3 приведена зависимость отключающей способности от времени упреждения взрывом нуля тока. Из графика видно, что несмотря на увеличение энергии, вводимой в промежуток в интервале 50—300 мкс, наблюдается рост отключающей способности. Он связан, как оказалось, с увеличением локального давления в зоне промежутка. Расчеты, выполненные по [Л. 4] на основании аналогии между взрывом в замкнутом объеме и глубоководным, показывают, что действие ударной волны ко времени 50 мкс заканчивается, а рост давления в промежутке обусловлен расширением полости с продуктами детонации. При дальнейшем увеличении времени упреждения давление от взрыва снижается за счет потери энергии при излучении волн сжатия и охлаждения продуктов детонации, чем и объясняется уменьшение отключающей способности. Максимальная отключающая способность наблюдается в области времени упреждения взрывом нуля тока 300 мкс, при этом отключенный эквивалентный ток равен 126 кА. Дальнейшего роста отключающей способности можно достигнуть, увеличив длину промежутка, что подтверждается зависимостью 3 на рис. 4.

Рис. 4. Зависимость отключающей способности СВДУ от величины межконтактного промежутка при времени упреждения 300 мкс и расстоянии между зарядом ВВ и промежутком:
1 — 138 мм; *2* — 45 мм; *3* — 25 мм; *4* — 20 мм.



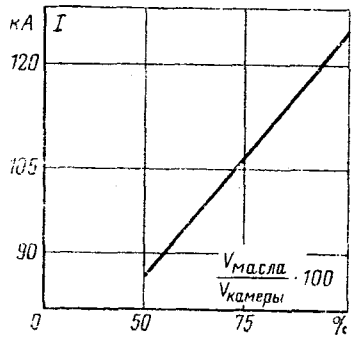


Рис. 5. Зависимость отключающей способности СВДУ от степени заполнения трансформаторным маслом при времени упреждения 300 мкс, промежутке 5 мм и расстоянии до заряда ВВ 25 мм.

В интервале 2,5—10 мм наблюдается линейный рост отключающей способности от размеров промежутка, причем вид функции остается неизменным при расстоянии между зарядом ВВ и промежутком, равном 138, 45, 25 и 20 мм. Приближение заряда ВВ к промежутку со 138 до 20 мм ведет к увеличению отключающей способности с 75,5 до 195 кА, очевидно, за счет роста локального давления в межконтактной зоне.

В реальных конструкциях СВДУ для снижения динамических нагрузок на корпус в дугогасительный наполнитель помещаются воздушные включения. Объем их влияет на давление в СВДУ, а следовательно, на эффективность отключения и срок службы основных элементов устройства. В этой связи были проведены исследования влияния степени заполнения корпуса дугогасительным наполнителем на отключающую способность СВДУ. Так, при уменьшении заполнения трансформаторным маслом камеры СВДУ объемом 1430 см³ со 100% до 50% отключаемый ток снижается со 126 до 88,4 кА (рис. 5). В условиях 50%-ного заполнения корпуса были проведены эксперименты при нахождении промежутка в масле и в воздухе. В последнем случае ток отключения снизился до 25,2 кА. Это подтверждает правильность выбранного направления помещать дугу отключения в дугогасительный наполнитель (трансформаторное масло).

Таким образом, проведенные исследования экспериментально показывают, что на промежутке 10 мм при времени упреждения 300 мкс и массе заряда ВВ 1,5 г можно отключить ток 195 кА при напряжении 19 кВ. При известном вре-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

мени упреждения, величина которого, по-видимому, не будет изменяться, увеличивая длину промежутка и массу заряда, в принципе можно достичь значительно большей мощности отключения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Клепарская Л. Г.** Синхронизированные выключатели. М.: Энергия, 1973.

2. **Фурукава Т., Миеси Н.** Сверхбыстродействующий токоограничивающий выключатель со специальным электрическим детонатором «УЛЬТРЭП». Фудзи дзихо, 1969, т. 42, № 5.

3. **Каплан В. В., Нашатырь В. М.** Коммутационные испытания высоковольтных аппаратов. Л.: Энергия, 1969.

4. **Коул Р.** Подводные взрывы. М.: Изд-во иностр. литературы, 1950.

[13.6.1978]

УДК 621.38.001.1

Некоторые топологические вопросы теории электронных схем

КНЯЗЬ А. И.

Одесский электротехнический институт связи

Процесс проектирования современной радиоэлектронной аппаратуры характеризуется тесным взаимодействием этапов схемотехнического и конструкторско-топологического проектирования соответствующих электронных цепей [Л. 1—3]. Электронные схемы в отличие от физических моделей — электронных цепей — не учитывают метрических параметров последних, а отражают только их топологические характеристики. Вопросы топологии в теории электронных схем излагают с использованием замены каждого многополюсного компонента полюсным графом [Л. 4 и 5]. Получается граф, содержащий на месте компонентов двухполюсные ветви, которые существенно усложняют граф всей схемы. В таком графе ветви, соответствующие компонентам, и ветви, соответствующие соединительным проводам, неразличимы. Это не позволяет использовать его в конструкторских разработках, где такое различие существенно, ибо процесс проектирования состоит из выбора номиналов компонентов и конструирования коммутатора цепи [Л. 6].

Проектировщик радиоэлектронной аппаратуры при решении вопросов размещения и трассировки представляют схемы в виде двудольного графа. В данной статье показано, что не только при проведении конструкторских разработок, но и при анализе принципиальных схем целесообразно использовать одни и те же топологические матрицы типа применяемых в теории проектирования, а не в теории электронных схем.

Пусть цепь состоит из n компонентов, каждый из которых содержит m_k выводов (полюсов), так что общее число полюсов

$$M = \sum_{k=1}^{n} m_k. \qquad (1)$$

жутков) с неизвестными напряжениями u_k по часовой стрелке.

Компоненты подсоединяются к коммуникатору, одним из вариантов практической реализации которого может быть печатная плата с расположенными на ней деревьями [Л. 6 и 7]. Ветви дерева приобретают номера тех выводов компонентов, которые к ним подсоединены (припаяны). Общее число деревьев обозначим через $r+1$. Такие деревья прокладываются в процессе трассировки и содержат как топологическую, так и метрическую информацию. В теории схем достаточно сохранить только топологическую информацию, а именно порядок чередования по часовой стрелке номеров выводов (полюсов) деревьев. В переборе вариантов деревьев (рис. 1,*б* и *в*), отличающихся порядком чередования полюсов, и состоят топологические аспекты проблемы трассировки. Изображая деревья в виде заштрихованных многополюсников рис. 1,*г*, а многополюсники в виде рис. 1,*а*, приходим к двудольному графу схемы. В качестве примера на рис. 2 указан двудольный граф для схемы транзисторного усилителя (см. рис. 1.27 [Л. 5]).

Поскольку проводники, соединяющие выводы компонентов любой цепи, могут быть без пересечения расположены на двусторонней печатной плате, все многообразие схем удобно подразделить на одноплanарные и двупланарные схемы.

Топологические матрицы одноплanарной схемы. Для полного описания схемы с многополюсными компонентами необходимы три топологические матрицы: матрица многополюсников **M**, матрица деревьев **D**, матрица контуров **K**. При выбранной нумерации компонентов и их полюсов матрица **M** имеет единственный вид: номера столбцов соответствуют номерам полюсов, а номера строк — номерам компонентов, причем принадлежность полюса компоненту отмечается единицей, в противном случае — нулем. Например, по графу рис. 2 составляем следующую матрицу **M**:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
I	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IV	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
VII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
VIII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
IX	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

(2)

Условимся, что последовательность чередования выводов компонента конструктивно фиксирована (см. табл. 4.9.1 [Л. 2]), и произведем нумерацию выводов каждого компонента по часовой стрелке. Изображение компонента многополюсником (рис. 1,*а*) учитывает порядок чередования полюсов с неизвестными токами полюсов i_k (для единообразия все токи выбираются входящими) и дуг (межполюсных промежутков) с неизвестными напряжениями u_k по часовой стрелке.

Обратим внимание на то, что в матрице **M** порядок расположения единиц в строке соответствует обходу полюсов многополюсника по часовой стрелке, причем для последнего полюса многополюсника следующим полюсом будет начальный полюс.

С использованием матриц-столбцов неизвестных токов полюсов $i_k(t)$ и неизвестных напряжений дуг $u_k(t)$ компонентов

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

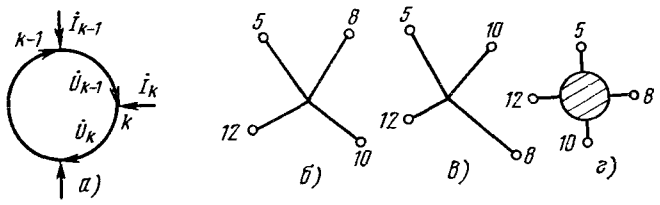


Рис. 1.

($k=1, 2, \ldots, M$) и матрицы многополюсников **M** записываются системы уравнений Кирхгофа для токов и напряжений:

$$\mathbf{M}\cdot\mathbf{i}=0; \quad (3)$$

$$\mathbf{M}\cdot\mathbf{u}=0. \quad (4)$$

Составляя матрицу деревьев, нужно отразить в ней не только принадлежность конкретных полюсов дереву, но и порядок их чередования по часовой стрелке. Последнее обстоятельство упускают из виду как в теории схем, так и при конструировании радиоэлектронной аппаратуры.

Планарному графу, планарной схеме соответствует конкретный порядок чередования полюсов деревьев (рис. 2), поэтому отдать предпочтение матрице планарных деревьев $\mathbf{D}'_0$ по сравнению с семейством возможных матриц $\mathbf{D}'$ целесообразно не только при составлении расчетных уравнений схемы, но и при проектировании почетного монтажа цепи. В матрице деревьев номера строк соответствуют номерам деревьев, а номера столбцов — номерам полюсов деревьев, причем столбцы располагаются в произвольной последовательности, если это матрица нефиксированных деревьев $\mathbf{D}'$, и в определенной последовательности, если это матрица фиксированных деревьев $\mathbf{D}'_0$. Полезно нумеровать вначале все двухполюсные деревья графа, тогда во всех матрицах $\mathbf{D}'$ и $\mathbf{D}'_0$, соответствующих этим деревьям, подматрицы являются одними и теми же. Принадлежность полюса конкретному дереву отмечается единицей. Составленная на рис. 2 матрица $\mathbf{D}'_0$ имеет вид:

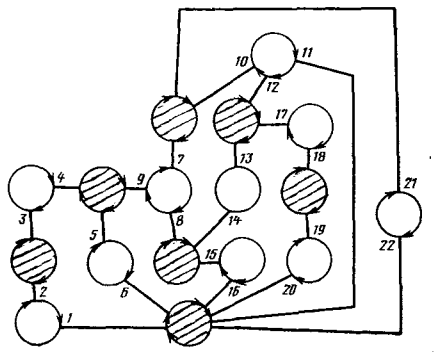


Рис. 2.

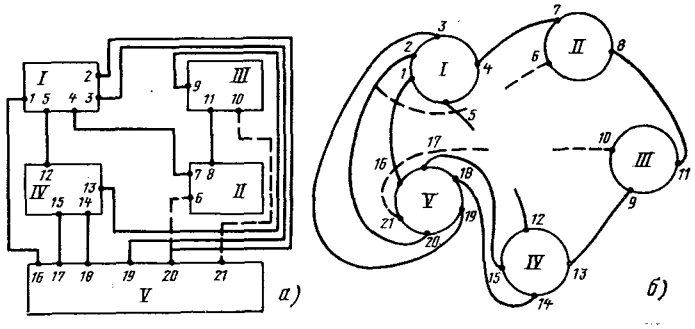


Рис. 3.

сближает схемотехническое и конструкторское проектирование, облегчает сопоставление результатов расчета и эксперимента.

Контуры цепи как некоторые линии в отличие от деревьев

	2	3	18	19	4	9	5	14	15	8	21	10	7	12	17	13	1	6	16	20	11	22
I	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
III	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IV	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
VII	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

(5)

Последняя строка матриц $\mathbf{D}'_0$ и $\mathbf{D}'$ соответствует дереву с максимальным числом выводов (внешнему дереву). Если опустить эту строку, получим матрицы $\mathbf{D}_0$, $\mathbf{D}'$ с помощью которых записываются r независимых уравнений Кирхгофа для токов:

$$\mathbf{D}\cdot\mathbf{i}=0. \quad (6)$$

Превращение произвольной матрицы $\mathbf{D}'$ в матрицу планарных деревьев $\mathbf{D}'_0$, т. е. установление определенного порядка чередования столбцов, составляет топологическую часть проблемы трассировки без пересечений. Иногда это удается сделать эвристически, сумев изобразить принципиальную схему без пересечения проводов, как для примера рис. 2. Формализованный способ обнаружения матрицы $\mathbf{D}'_0$ излагается ниже.

Перейдем к рассмотрению матрицы контуров. В теории схем контур нужно понимать как указание порядка чередования дуг компонентов. Уравнение Кирхгофа, записанное для контура схемы, совпадает с законом электромагнитной индукции, записанном для контура цепи, имеющего размеры и геометрическую форму [Л. 6]. Систему контуров схемы целесообразно поставить в соответствие системе контуров цепи, что платы не имеют материального воплощения, а потому могут выбираться как по количеству, так и по составу отрезков произвольно. Вопрос о независимом числе контуров, которые нужно ввести для цепи, более обоснованно связывать не с формулой Эйлера для многогранника, а исходя из следующего принципа: закон электромагнитной индукции в сочетании с законом полного тока описывает любую электромагнитную систему, ибо это два основных уравнения электродинамики. Поэтому по приближенному закону электромагнитной индукции — второму уравнению Кирхгофа — записывается столько уравнений, сколько не хватает для полноты системы при нахождении M неизвестные токов и M неизвестных напряжений компонентов. А именно компонентные уравнения составляют систему из n уравнений, уравнения (3) или (4) добавляют еще M уравнений, по (6) имеем r уравнений; поэтому контурных уравнений нужно составить

$$p=2M-(n+M+r)=M-n-r. \quad (7)$$

При составлении топологических матриц полезно использовать $(p+1)$-й внешний контур.

Матрица контуров $\mathbf{K}'$ одноплanарного графа составляется как матрица ячеечных контуров: номера столбцов соответст-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

вуют номерам дуг компонентов, входящих в контур, а номера строк соответствуют номерам контуров. По графу рис. 2 имеем матрицу контуров $\mathbf{K}'$ следующего вида:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
I	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
III	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
IV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0
V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
VII	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

(8)

Если опустить в этой матрице последнюю строку, получим матрицу $\mathbf{K}$, с помощью которой записывается p независимых уравнений Кирхгофа:

$$\mathbf{K}\cdot\mathbf{u}=0. \tag{9}$$

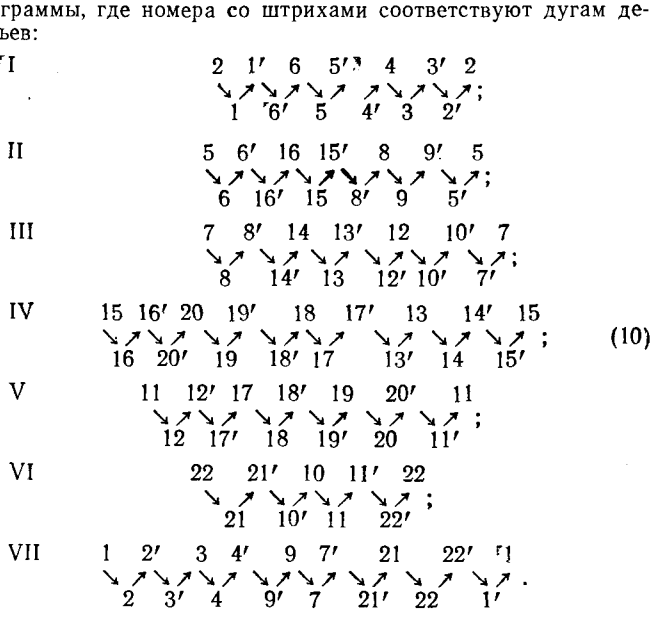
Матрицу контуров $\mathbf{K}'$ можно формировать по матрице $\mathbf{M}$ и матрице планарных деревьев $\mathbf{D}_0$ без обращения к схеме цепи, что важно для реализации предлагаемого алгоритма на ЦВМ. В основу процесса формирования положим следующие принципы:

каждый из $p+1$ контуров состоит из дуг одного направления, совпадающего с направлением обхода, причем у компонента дуга направлена от меньшего номера вывода к большему;

каждая из M дуг компонентов и каждая из M дуг деревьев входит в какой-либо ячеечный контур и только в него;

в контур не могут входить две дуги одного компонента, т. е. проход по дугам может совершаться от некоторого вывода к ближайшему; аналогичный принцип выполняется для дуг деревьев.

На основании этих принципов алгоритм выборки элементов матриц $\mathbf{M}$ и $\mathbf{D}'_0$ можно представить в виде следующей диаграммы, где номера со штрихами соответствуют дугам деревьев:



(10)

По верхним строчкам цепочек этой диаграммы матрица $\mathbf{K}'$ (8) получается непосредственно путем учета номеров дуг компонентов (без штрихов).

Если удается реализовать предложенный алгоритм с использованием $\mathbf{M}$ и некоторой матрицы $\mathbf{D}'$, то значит матрица $\mathbf{D}'$ является матрицей планарных деревьев $\mathbf{D}'_0$. Это положение позволяет формализовать процесс получения матрицы $\mathbf{D}'_0$. А именно, имея некоторую матрицу $\mathbf{D}$, составленную по принципиальной схеме, начинаем в соответствии с вышеизложенным менять порядок столбцов для деревьев с выводами более трех. Каждую новую матрицу $\mathbf{D}'$ в совокупности с $\mathbf{M}$ проверяем на возможность реализации алгоритма построения матрицы ячеечных контуров $\mathbf{K}'$, и таким путем находим матрицу $\mathbf{D}'_0$, если она существует.

Топологические матрицы двупланарных схем. Представляя заданную схему в виде двудольного графа, можно определить число пересечений проводов, которые делают схему двупланарной [Л. 8]. Будем называть ветви деревьев на одной стороне плоскости печатными, а ветви деревьев на другой стороне плоскости — навесными. Ввиду большого разнообразия существующих схем единого алгоритма отделения навесных ветвей не существует. Поэтому предлагается следующий вариант такой процедуры.

Максимально упрощаем вид схемы за счет представления ее планарных подсхем в виде многополюсных компонентов, в частности, за счет преобразований подсхем, содержащих планарные соединения двухполюсников.

Располагаем компоненты вдоль замкнутой линии — обода (например, окружности) так, чтобы спереди и сзади от некоторого компонента располагались компоненты, имеющие с ним наибольшее число проводов. Это можно делать вручную, по схеме, либо формализовать процесс, если использовать матрицу $\mathbf{Q}$ (см. формулу 1.3.3 [Л. 2]):

$$\mathbf{Q}=\mathbf{M}\cdot\mathbf{D}'^{t}, \tag{11}$$

где с помощью t отмечена операция транспонирования. Полученный порядок следования компонентов по ободу будет учтен в матрице $\mathbf{M}$, если пронумеровать компоненты в порядке очередности по часовой стрелке.

Процесс раскладки печатных ветвей деревьев производим в такой последовательности:

все ближайшие компоненты получают по одному двухполюсному печатному дереву, после чего образуется контур-обод, причем оставшиеся еще свободными полюсы компонентов распадаются на множества расположенных внутри обода M_1 и вне обода M_2;

продолжаем наносить оставшиеся двухполюсные деревья между ближайшими компонентами, учитывая, что принадлежность соединяемых полюсов одному из множеств M_1 или M_2 указывает на прокладку печатного дерева, а принадлежность полюсов разным множествам M_1 и M_2 означает прокладку навесного дерева; после этого шага оставшиеся полюсы располагаются в новых множествах M_3, M_4, M_5, ...;

дальнейшую прокладку ветвей деревьев делаем аналогичным образом, связывая компоненты через один, через два и т. д.

Итак, в основе предложенного алгоритма лежит принцип постепенного разбиения множества полюсов на подмножества и оценки принадлежности соединяемых полюсов одному или разным множествам. Он оказывается удобным для выполнения операций на ЦВМ.

Для двупланарных схем матрицы $\mathbf{M}$, $\mathbf{D}'$ и $\mathbf{K}'$ составляем из печатной и навесной подматриц, т. е. подматриц, содержащих столбцы для выводов, соединенных с ветвями деревьев печатным или навесным способом. В отличие от матриц для однопланарных схем здесь для указания расположения дуг по столбцам недостаточно одной цифры, а нужны цифры начала и конца дуги, ибо планарному подграфу принадлежат дуги, соединяющие не ближайшие по номеру полюсы компонента, а через один полюс, который подсоединен к навесной ветви дерева.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Итак, произвольную схему можно представить в виде двупланарной схемы, что будет затем отражено в печатных $\mathbf{M}_п$, $\mathbf{D}_{0п}$ и навесных $\mathbf{M}_н$, $\mathbf{D}_н$ подматрицах матриц $\mathbf{M}$ и $\mathbf{D}'$. Для печатного подграфа с использованием подматриц $\mathbf{M}_п$, $\mathbf{D}_{0п}$ осуществляем построение подматрицы печатных контуров $\mathbf{K}_п$. В подматрице остается столько столбцов, сколько имеется навесных ветвей деревьев. Считая, что каждая навесная ветвь порождает один печатно-навесной контур, составляем подматрицу $\mathbf{K}_н$. По подматрицам $\mathbf{K}_п$ и $\mathbf{K}'_н$ формируется матрица контуров двупланарной схемы $\mathbf{K}'$.

В качестве иллюстрирующего примера рассмотрим схему рис. 2.3.3 [Л. 2]. На рис. 3,*а* сплошными линиями указаны печатные ветви деревьев, а штриховыми линиями обозначены навесные ветви деревьев. Двупланарная схема рис. 3,*а* получена по предложенному алгоритму: по схеме рис. 2.3.3 [Л. 2] видно, что компоненты нижний и левый верхний компоненты имеют наибольшее число соединений, поэтому они приобретают первый и последний номер при их расположении по ободу (рис. 3,*б*).

Соседство остальных компонентов при их размещении на ободе, т. е. расстановка номеров II, III и IV производится по наличию между компонентами проводов. Распределение номеров по компонентам может произвести и ЦВМ без обращения к схеме, если использовать матрицу $\mathbf{Q}$. По принципиальной схеме произвольным образом нумеруем компоненты, деревья и составляем матрицу $\mathbf{Q}$, в которой отмечаются связи между компонентами (строки) и деревьями (столбцы). Например, по схеме рис. 2.3.3 [Л. 2] имеем:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	I
2	0	0	0	0	0	7	1	1	1	0	III
3	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	IV
4	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	II
5	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	V

(12)

Рассматривая возможные сочетания строк по две, т. е. все варианты C^2_n, где n — число компонентов, на первое место ЦВМ поставит вариант, в котором в столбцах имеется наибольшее повторение единиц. Например, строки 1 и 5 имеют совпадение единиц в столбцах 1, 6, 10 (всего три). Таким путем автоматически будет указан порядок новой нумерации компонентов, соответствующий расположению по ободу (рис. 3,*б*) и обозначенный справа в матрице (12) римскими цифрами. Дальнейшая реализация алгоритма ясна из схемы рис. 3,*б*. Процесс разбиения множества номеров выводов M на множества M_1, M_2 и M_3, M_4, M_5 ... также может быть поручен ЦВМ.

Необходимо иметь в виду, что задача представления некоторой схемы двупланарным графом имеет не одно решение, но в теории схем для (6) и (9) подходят матрицы $\mathbf{D}$ и $\mathbf{K}$, составленные по любому из вариантов двупланарного графа. Поэтому отбор из двупланарных графов графа с максимально плоским подграфом или еще с какими-либо дополнительными свойствами относится к проблемам теории проектирования и здесь не рассматривается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Теория** и методы автоматизации проектирования вычислительных систем/ Под ред. М. Брейера, М.: Мир, 1977.
2. **Селютин В. А.** Машинное конструирование электронных устройств. М.: Советское радио, 1977.
3. **Ильин В. Н., Фролкин В. Г.** Состояние, задачи и перспективы развития автоматизации схемотехнического проектирования. — Известия вузов. Радиоэлектроника, 1976, № 6.
4. **Сигорский В. П., Петренко А. И.** Основы теории электронных схем. Киев: Высшая школа, 1971.
5. **Сигорский В. П., Петренко А. И.** Алгоритмы анализа электронных схем. М.: Советское радио, 1976.
6. **Тозони О. В., Князь А. И.** Электродинамическая трактовка основ теории цепей. — В кн.: Кибернетика и вычислительная техника. Киев: Наукова думка, 1977, вып. 35.
7. **Тозони О. В.** Электродинамическая теория цепей. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1977, № 1.
8. **Мелихов А. Н., Берштейн Л. С., Курейчик В. М.** Применение графов для проектирования дискретных устройств. М.: Наука, 1974.

[14.4.1978]

УДК 621.313.332.001.24

О расчете асинхронного генератора с двумя статорными обмотками

Канд. техн. наук ФРИШМАН В. С., инж. ПРОХОРОВА Г. А.

Краснодар

Ручной электроинструмент, получающий возрастающее применение при механизации трудоемких работ в ряде отраслей сельскохозяйственного производства, требует простых и надежных автономных источников электроэнергии повышенной частоты и пониженного напряжения (200 Гц, 36 В) при относительно небольшой мощности (до 5 кВ·А). Результатами исследований и опытными данными подтверждена целесообразность применения для этих целей короткозамкнутых асинхронных генераторов с конденсаторным самовозбуждением [Л. 1]. Однако использование обычных асинхронных машин, рассчитанных на указанную частоту и напряжение, практически невозможно из-за трудности самовозбуждения при столь низком напряжении, а машины с более высоким номинальным напряжением, скажем 220 В, потребуют понижающих трансформаторов, что для передвижных установок нежелательно из-за увеличения массо-габаритных показателей.

Выходом из положения является использование в генераторном режиме асинхронной машины с двумя электрически несвязанными статорными обмотками (АГДО). При этом одна обмотка — рабочая (ОР), рассчитанная на 36 В, служит для питания нагрузки; другая — обмотка возбуждения (ОВ), к которой подключена конденсаторная батарея, рассчитывается на более высокое напряжение (220 или 380 В).

Асинхронный генератор такого исполнения сочетает достоинства простой бесконтактной машины с повышенной по сравнению с асинхронным генератором нормального исполнения устойчивостью [Л. 2]. Вместе с тем, как и всякому асинхронному генератору, АГДО свойственно значительное снижение напряжения при подключении двигательной (активно-индуктивной) нагрузки, что ведет к существенному недоиспользованию машины по мощности. Устранение этого нежелательного свойства требует применения специальных компаундирующих устройств для автоматической стабилизации напряжения, что усложняет электроустановки и затрудняет их обслуживание.

Учитывая, что стабильность напряжения асинхронного генератора достигается в какой-то мере оптимизацией магнитного насыщения машины, реальным представляется решить задачу с помощью соответствующего конструирования магнитной цепи или (для существующих машин) пересчета обмоток. До настоящего времени этот вопрос, как и методика расчета АГДО, не получили достаточного освещения.

Ниже рассматривается расчет АГДО, способного обеспечить питание двигательных нагрузок без специальных компаундирующих устройств. В основу расчета положен предварительный анализ условий и режимов работы элементов схемы АГДО, при этом двухобмоточный генератор рассматривается как эквивалентный трансформатор с двумя первичными и одной вторичной обмоткой (рис. 1).

Одной из первичных обмоток является цепь ротора, вращаемого первичным двигателем и выполняющего функции источника активной энергии, идущей на покрытие активных

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

потерь АГДО и нагрузки, что эквивалентно приложенному к ней напряжению

$$U_2 = I_2 r_2 \frac{1-s}{s},$$

где I_2, r_2 — ток и активное сопротивление цепи ротора; s — отрицательное скольжение.

В качестве другой первичной обмотки рассматривается статорная обмотка возбуждения, замкнутая на конденсаторную батарею, являющуюся источником реактивной мощности. Третья обмотка, рабочая, является вторичной.

Такое рассмотрение эквивалентного трансформатора соответствует действительному назначению его обмоток и по сравнению с другими методами [Л. 2 и 3] упрощает анализ режимов работы АГДО.

В соответствии со схемой рис. 1 для режима работы АГДО под нагрузкой может быть записана система уравнений, в которой индекс «1» присвоен параметрам ОВ, «2» — цепи ротора и «3» — параметрам ОР (все параметры приведены к ОВ):

$$\left.\begin{aligned}
\dot U'_2 &= \dot E'_2 - \dot I'_2 r'_2 - j\omega \dot I'_2 L'_2 - j\omega \dot I_1 M'_{12} - j\omega \dot I'_3 M'_{32};\\
\dot U_C &= \dot E_1 - \dot I_1 r_1 - j\omega \dot I_1 L_1 - j\omega \dot I'_3 M'_{31} - j\omega \dot I'_2 M'_{12};\\
\dot U_C &= -j\frac{\dot I_1}{\omega C};\\
\dot E'_3 &= \dot U'_3 + \dot I'_3 r'_3 + j\omega \dot I'_3 L'_3 + j\omega \dot I_1 M'_{31} + j\omega \dot I'_2 M'_{32};\\
\dot I_0 &= \dot I_1 + \dot I'_2 + \dot I'_3;\\
\dot E_1 &= \dot E'_2 = E'_3;\\
\dot U'_3 &= \dot I'_3 (r'_н + j\omega L'_н),
\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

где $r'_н$, $L'_н$ — активное сопротивление и индуктивность нагрузки; M'_{12}, M'_{13}, M'_{23} — коэффициенты взаимоиндукции соответствующих обмоток.

Если обозначить коэффициенты самоиндукции обмоток соответственно M_{11}, M_{22}, M_{33}, то индуктивности этих обмоток составят:

$$\left.\begin{aligned}
L_1 &= M_{11} + M'_{12} + M'_{13};\\
L'_2 &= M'_{22} + M'_{12} + M'_{23};\\
L'_3 &= M'_{33} + M'_{13} + M'_{23}.
\end{aligned}\right\} \quad (2)$$

Выполнив рекомендуемые для таких трансформаторов преобразования [Л. 5], можем представить (1) и (2) в виде:

$$\left.\begin{aligned}
\dot U_C &= \dot I_0 r_0 + j\omega \dot I_0 M'_{12} - j\omega \dot I_1 (M_{11} + M'_{12}) - \\
&\quad - \dot I_1 r_1 - j\omega (\dot I_0 - \dot I'_2)(M'_{13} - M'_{12});\\
\dot U_C &= -j\dot I_1 \frac{1}{\omega C};\\
\dot U'_2 &= \dot I_0 r_0 + j\omega \dot I_0 M'_{12} - \dot I'_2 r'_2 - j\omega \dot I'_2 (M'_{22} + \\
&\quad + M'_{12}) - j\omega (\dot I_0 - \dot I_1)(M'_{23} - M'_{12});\\
\dot U'_2 &= \dot I'_2 r'_2 \frac{1-s}{s};\\
\dot U'_3 &= \dot I_0 r_0 + j\omega \dot I_0 M'_{12} - \dot I'_3 r'_3 - j\omega \dot I'_3 (M'_{33} + \\
&\quad + M'_{12}) - j\omega (\dot I_0 - \dot I'_2)(M'_{13} - M'_{12}) - \\
&\quad - j\omega (\dot I_0 - \dot I_1)(M'_{23} - M'_{12});\\
\dot I_1 &= \dot I'_2 + \dot I'_3 = \dot I_0,
\end{aligned}\right\} \quad (3)$$

где $r_0 = \frac{P_{ст}}{I^2_0}$; $P_{ст}$ — потери в стали.

Анализ, проведенный с учетом схемы замещения и векторных диаграмм, соответствующих системе (3), позволяет указать некоторые особенности расчета таких генераторов. Основные из них рассмотрены ниже.

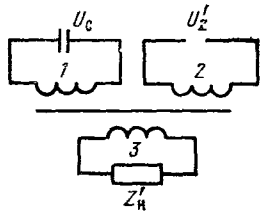


Рис. 1. Принципиальная схема трансформатора, эквивалентного двухобмоточному генератору.
1 — обмотка возбуждения; *2* — обмотка ротора; *3* — рабочая обмотка.

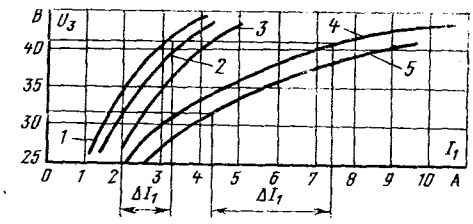


Рис. 2. Экспериментальные характеристики двухобмоточных асинхронных генераторов при различной степени насыщения.
1 — характеристика холостого хода (коэффициент насыщения $k_\mu = 2{,}05$); *2* — нагрузочная характеристика ($k_\mu = 2{,}05$, $I_3 = 6$ А; $\cos\varphi = 1$); *3* — нагрузочная характеристика ($k_\mu = 2{,}05$, $I_3 = 6$ А; $\cos\varphi = 0{,}3$); *4* — характеристика холостого хода ($k_\mu = 2{,}75$); *5* — нагрузочная характеристика ($k_\mu = 2{,}75$; $I_3 = 6$ А; $\cos\varphi = 1$).

Наибольший ток ОВ соответствует холостому ходу АГДО.

Если пренебречь размагничивающим влиянием тока ротора на холостом ходу, то

$$I_{1max} = I_{1x.x} \approx I_0,$$

поэтому расчетным режимом для ОВ следует считать режим холостого хода. Уменьшение тока намагничивания, идущего на возбуждение генератора, при подключении нагрузки приводит к снижению напряжения на зажимах U_3 за счет уменьшения основного магнитного потока и внутреннего падения напряжения в рабочей обмотке.

Правилами устройства электроустановок допускается для автономных источников колебание напряжения в пределах ±10% номинального значения. Для АГДО, который предполагается использовать без стабилизирующего устройства, границы колебаний напряжения, соответствующие допустимым по ПУЭ, следует считать расчетными для рабочей обмотки.

При номинальном напряжении $U_3 = 36$ В, напряжение холостого хода $U_{3x.x} = 41$ В, а минимальное напряжение $U_{3min} = 32$ В. Поэтому при определении числа витков ОР следует учитывать увеличение напряжения на этой обмотке при холостом ходе, а при определении сечения витков исходить из максимального тока нагрузки, соответствующего минимальному значению U_{3min}.

Для магнитной системы АГДО расчетным следует считать режим холостого хода, при котором основной магнитный поток максимален.

На рис. 2 приведены экспериментальные характеристики холостого хода и нагрузочные для АГДО при различных коэффициентах насыщения. Сопоставление характеристик показывает, что чем выше насыщение стали на холостом ходу, тем больше возможная нагрузка генератора в допустимых пределах напряжения. Следовательно, расчет должен предусматривать максимально возможное насыщение стали генератора при холостом ходе $\left(k_\mu = \frac{\Sigma F}{F_\delta} = 2 \div 3\right)^*$.

Известно [Л. 4], что с увеличением насыщения возрастают потери в стали.

Для генераторов мощностью до 5 кВ·А потери в стали на холостом ходу могут достигать 15% максимально допустимой активной мощности генератора. Для их уменьшения насыщение машины следует осуществлять в основном за счет

* Здесь и далее непоясненные обозначения соответствуют [Л. 4].

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

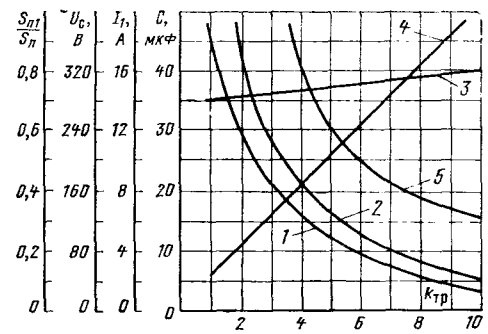


Рис. 3. Расчетные характеристики двухобмоточных асинхронных генераторов в зависимости от коэффициента трансформации, определяемого отношениями числа витков обмоток возбуждения и рабочей

1 — $C=f_1(k_{тр})$; $k_\mu=2,05$; 2 — $I_1=f_2(k_{тр})$; $k_\mu=2,05$; 3 — $\frac{S_{п1}}{S_п}=f_3(k_{тр})$; $k_\mu=2,05$; 4 — $U_c=f_4(k_{тр})$; $k_\mu=2,75$; 5 — $I_1=f_5(k_{тр})$; $k_\mu=2,75$.

зубцовой зоны статора и ротора. При этом имеется в виду, что потери в стали зависят от массы стали участка магнитной цепи, а для зубцовой зоны эта масса достигает третьей части массы стали спинок статора и ротора.

С учетом изложенного авторами выполнен расчет АГДО с использованием пакета стали асинхронного двигателя типа К-6 ($P_н=1,7$ кВт; $U_н=36$ В; $f_н=200$ Гц; $\cos\varphi_н=0,7$; $\eta_н=70\%$).

По заданной индукции в воздушном зазоре $B_{\delta x.x}=0,7$ Т определялся магнитный поток в зазоре при холостом ходе:

$$\Phi_{x.x}=B_{\delta x.x}a_\delta\tau l_\delta.$$

Число витков ОР, соответствующее $U_{3max}=E_{3x.x}$ и $\Phi_{x.x}$, определялось по известной формуле:

$$w_3=\frac{E_{3x.x}10^8}{4k_\delta f\Phi_{x.x}k_{o1}}. \quad (4)$$

Число витков обмотки возбуждения ОВ находится в определенной зависимости от коэффициента трансформации $k_{тр}=\frac{E_1}{E_3}$, выбор которого требует некоторых пояснений.

На рис. 3 приведены кривые зависимостей I_1, C_1, U_c $\frac{S_{п1}}{S_п}$ от $k_{тр}$. Кривые показывают, что при определенном числе витков рабочей обмотки w_3 и постоянной плотности тока j степень заполнения паза витками ОВ $\left(\frac{S_{п1}}{S_п}\right)$ с увеличением числа витков этой обмотки меняется незначительно. Это же подтверждается данными следующего анализа:

$$S_{п1}=S_{медь1}+S_{из1}=\frac{1,4p\Sigma F}{m_1q_1k_{o1}jk_{зап}}+2\Delta d\sqrt{\frac{1,4p\Sigma Fn_3k_{тр}}{m_1q_1k_{o1}jk_{зап}}}, \quad (5)$$

где $S_{п1}$, $S_{медь1}$, $S_{из1}$ — площади сечения паза, занятого витками ОВ, медью и изоляцией витков ОВ; Δd — толщина изоляции провода ОВ; j — плотность тока в обмотке.

Заменяя в (5) постоянные величины коэффициентами A и B, получаем несложную зависимость $S_{п1}$ от $k_{тр}$:

$$S_{п1}=A+B\Delta d\sqrt{k_{тр}}.$$

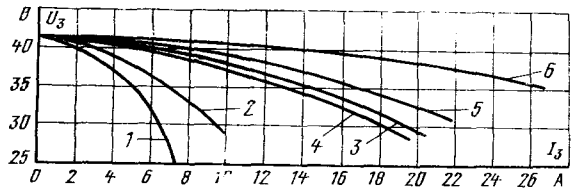


Рис. 4. Внешние характеристики двухобмоточных асинхронных генераторов при различном насыщении для разных видов нагрузки.

1 — $\cos\varphi=0,3$; 2 — $\cos\varphi=0,7$; 3 — $\cos\varphi=1,0$; 4 — $\cos\varphi=0,3$; 5 — $\cos\varphi=0,7$; 6 — $\cos\varphi=1$; 1—3 — $k_\mu=2,05$; 4—6 — $k_\mu=2,75$.

Уменьшение числа витков ОВ и вызванное этим уменьшение $k_{тр}$ приводят к некоторому увеличению запаса реактивной мощности конденсаторной батареи:

$$I_1=\frac{p\Sigma F}{0,9m_1w_1k_{o1}k_{тр}}=\frac{N}{k_{тр}};$$

$$C=\frac{I_1}{U_c\omega}=\frac{M}{k^2_{тр}},$$

так как $U_c\approx U_3k_{тр}$.

Но при уменьшении $k_{тр}$ увеличивается размагничивающее действие тока нагрузки I'_{3r}, определяемого отношением $I_{3r}/k_{тр}$, где I_{3r} — размагничивающая составляющая тока нагрузки, поэтому $k_{тр}$ выбирается только с учетом минимальных габаритов возбуждающих конденсаторных батарей и их рабочего напряжения. Степень насыщения машины при определенных линейных размерах и запас реактивной мощности конденсаторов можно менять в зависимости от числа витков ОР, что видно из (4).

С учетом указанных условий расчеты АГДО были выполнены в двух вариантах.

Вариант 1: $w_3=18$ витков; $w_1=132$ витка; $z_2=22$; $C_\Delta=5$ мкФ; $I_{1x.x}=3,3$ А; $k_\mu=2,05$.

Вариант 2: $w_3=15$ витков; $w_1=90$ витков; $C_\Delta=15$ мкФ; $I_{1x.x}=8$ А; $k_\mu=2,75$.

На рис. 3 кривая 5 соответствует второму варианту, в котором число витков w_3 уменьшено на 16% по сравнению с первым вариантом.

На рис. 2 и 4 приведены характеристики холостого хода, нагрузочные и внешние, снятые экспериментально для этих генераторов. Сопоставление кривых показывает, что увеличение насыщения (второй вариант) обеспечило возможность двухкратного увеличения активной и активно-индуктивной нагрузки генератора.

Лабораторные и производственные испытания этих генераторов полностью подтвердили результаты анализа, положенного в основу их расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фришман В. С.** Вопросы применения самовозбуждающихся асинхронных генераторов в сельском хозяйстве. — Труды Кубанского СХИ, 1970, вып. 39 (67).

2. **Капленко В. К., Ильина Л. А.** Режимы работы асинхронного генератора с двумя электрически несвязанными обмотками статора. — Труды Кубанского СХИ, 1970, вып. 39 (67).

3. **Шумов Ю. Н.** Схема замещения и векторная диаграмма асинхронного генератора с двумя обмотками статора. — Изв. вузов. Электромеханика, 1977, № 3.

4. **Виноградов Н. В., Горянинов Ф. А., Сергеев П. С.** Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1969.

5. **Калантаров П. А.** Схема, эквивалентная трехобмоточному трансформатору. — Электричество, 1948, № 3.

[10.4.1978]

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Сообщения

УДК 621.314.632

Устойчивость и быстродействие полууправляемых выпрямителей с системой управления интегрального типа

Канд. техн. наук ПРИДАТКОВ А. Г., инж. ИСХАКОВ А. С.

В последнее время получают распространение интегральные системы управления выпрямителей, имеющие ряд преимуществ по сравнению с вертикальными. В статье анализируются полууправляемые выпрямители с обратной связью по выходному напряжению на примерах различных структур, реализующих интегральный принцип управления. Эти структуры применительно к полностью управляемым выпрямителям рассмотрены в [Л. 1]. Здесь используется та же методика — аппарат нелинейных разностных уравнений, позволяющий с исчерпывающей полнотой изучить динамические свойства замкнутой системы, в том числе определить необходимые условия устойчивости и условие конечной длительности переходных процессов, называемое далее условием оптимального быстродействия.

Характерной особенностью интегральных систем управледля выпрямителей с обратной связью по напряжению является то, что они могут быть описаны нелинейным разностным уравнением вида

$$F_1(x_{n+1}) = F_0(x_n), \tag{1}$$

которое по аналогии с методом точечных отображений [Л. 2] достаточно просто поддается исследованию «в большом». Для этого в координатах F, x строятся функции F_0 и F_1, и решение уравнения (1) находят методом итераций. Анализ уравнения (1) «в малом» сводится к изучению линеаризованного уравнения

$$\Delta_{n+1} + q\Delta_n = 0, \tag{2}$$

где

$$q = \frac{a_0}{a_1}; \quad a_0 = \frac{dF_0}{dx_n}; \quad a_1 = \frac{dF_1}{dx_{n+1}}.$$

Выражение (2) позволяет определить условия сходимости итерационного процесса или необходимые условия устойчивости уравнения (1), а также найти условие оптимального быстродействия. Эти условия имеют вид:

$$|q| < 1, \tag{3}$$

$$q = 0. \tag{4}$$

Равенство (4) нельзя считать строгим условием оптимальности системы по быстродействию [Л. 3], так как оно справедливо только для малых отклонений. Может оказаться, что при конечных отклонениях переходный процесс сходится быстрее, если $q \neq 0$. В общем случае проектирование оптимальных по быстродействию систем должно основываться на анализе взаимного расположения функций F_0 и F_1. Тем не менее значение коэффициента q может служить оценкой степени быстродействия, поэтому аналогично [Л. 3] под оптимальной подразумевается система, для которой обеспечивается равенство (4).

Рассмотрим различные структуры, реализующие интегральный принцип управления, при условиях идеальности всех элементов и полной управляемости вентилей.

Структура I. Блок-схема этой структуры приведена на рис. 1,*а*. На вход интегратора подается выходное напряжение выпрямителя U_d. Как только выходной сигнал интегратора достигает значения уставки U_0, происходит срабатывание соответствующего устройства, которое формирует очередной управляющий импульс для выпрямителя и возвращает интегратор с помощью ключа сброса К в исходное состояние. Диаграмма на рис. 2,*а* поясняет работу схемы. Здесь и далее штриховкой показана интегрируемая вольт-секундная площадь.

Работа интегратора описывается соотношением

$$\frac{1}{T_c}\int_0^T U_d\,dt = U_0, \tag{5}$$

где T_c — постоянная времени интегратора; T — интервал дискретности m-фазной схемы.

Из (5) получаем выражение для регулировочной характеристики:

$$U_d = \frac{T_c}{T} U_0, \tag{6}$$

где $U_d = \frac{1}{T}\int_0^T U_d dt$—среднее значение выходного напряжения.

Достоинство данной схемы состоит в том, что для углов $\alpha > \pi/2 - \pi/m$ она работает синхронно с сетью, т. е. процесс интегрирования всегда начинается в момент перехода синусоиды через нуль. Синхронный режим интегральной системы описывается разностным уравнением нулевого порядка, и система реализует предельное быстродействие. Можно рекомендовать применение структуры I для однофазных выпрямителей с искусственной коммутацией, это позволит получить предельное быстродействие во всем диапазоне регулирования.

Структура II. Здесь (рис. 1,*б*) на вход интегратора поступает разность напряжений $(U_d - U_0)$. Формирование управляющих импульсов производится при достижении выходным сигналом интегратора нулевого значения (рис. 2,*б*). Эта структура является достаточно распространенной, на ее основе имеются промышленные разработки, например регулятор напряжения [Л. 4].

В установившемся режиме один такт работы интегратора описывается соотношением

$$\frac{1}{T_c}\int_0^T (U_0 - U_d)\,dt = 0. \tag{7}$$

Отсюда следует, что

$$U_d = U_0 = U_m \frac{m}{2\pi}\left[1 - \sin\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right)\right], \tag{8}$$

т. е. регулировочная характеристика этой структуры аналогична таковой для структуры I, нечувствительна к колебаниям частоты питающего напряжения.

Выполняя интегрирование выражения (7) в пределах от 0 до T_n, где $T_n = \frac{1}{\omega}\left(\frac{2\pi}{m} + \alpha_{n+1} - \alpha_n\right)$, получаем разностное уравнение первого порядка, описывающее динамику замкнутой системы

$$\frac{m}{2\pi}\left[1 - \sin\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right)\right]\alpha_{n+1} = \frac{m}{2\pi}\left[1 - \right.$$

$$\left. - \sin\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right)\right]\alpha_n - \sin\left(\alpha_n - \frac{\pi}{m}\right) + \sin\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right). \tag{9}$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

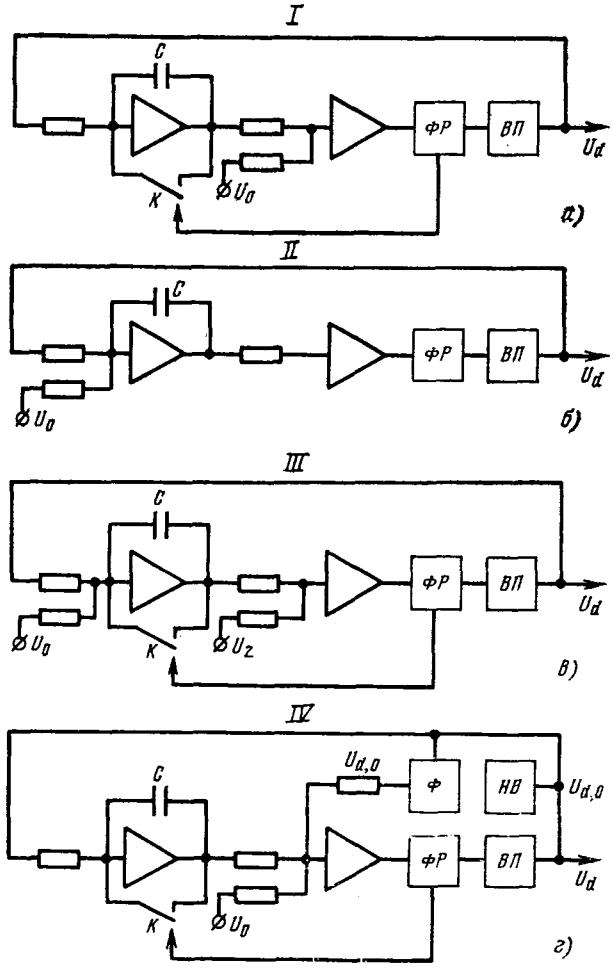


Рис. 1. Структуры интегральных систем управления.

ФР — формирователь-распределитель управляющих импульсов; *ВП* — выпрямитель; *Ф* — фильтр; *НВ* — неуправляемый выпрямитель.

Это уравнение свидетельствует о том, что переходный процесс длится несколько тактов, а не происходит мгновенно [Л. 4]. Для анализа устойчивости решения (9) найдем коэффициент q:

$$q = 1 - \frac{\cos\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right)}{\frac{m}{2\pi}\left[1 - \sin\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right)\right]}. \qquad (10)$$

Выполнив неравенство (3), приходим к важному с практической точки зрения выводу о фактической неработоспособности этой структуры для $m>2$ в полууправляемом режиме, а именно, для устойчивой работы угол α_0 не должен превышать значения α_1:

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{m} + \arcsin\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\pi}{m}\right)^2 + 1}} - \arcsin\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{m}{\pi}\right)^2 + 1}}. \qquad (11)$$

Кривая $\alpha_1(m)$ показана на рис. 3, там же нанесены значения углов $\alpha_{пр}=\pi/2-\pi/m$. Область устойчивой работы, заштрихованная на рис. 3, уменьшается с ростом числа фаз. В преобразователе с искусственной коммутацией устойчивая работа возможна, если $\alpha_1>\alpha_0$.

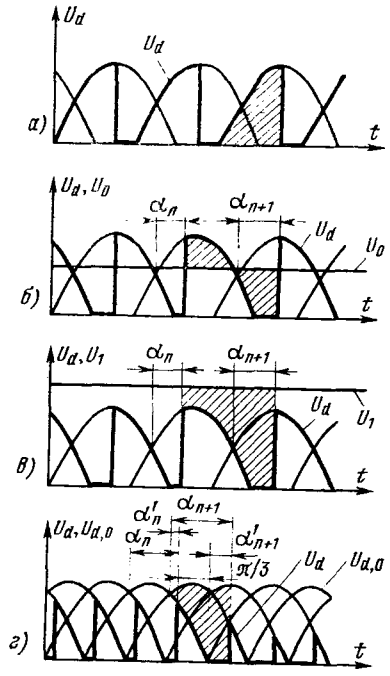


Рис. 2. Диаграммы работы структур, показанных на рис. 1.

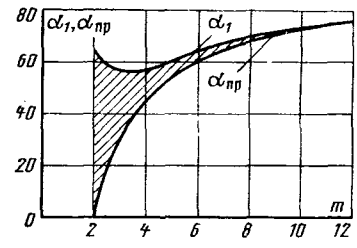


Рис. 3. Зависимость $\alpha_1(m)$ и $\alpha_{пр}(m)$.

Структура III. Эта структура (рис. 1,*в*) совмещает в себе свойства двух предыдущих. На вход интегратора подается разность между сигналом первой уставки U_1 и выходным напряжением U_d. Формирование очередного импульса производится в момент равенства сигнала интегратора напряжению второй уставки U_2. Описание работы конкретных схем, выполненных по этой структуре, имеется в [Л. 3].

Такт интегрирования в установившемся режиме описывается соотношением

$$\frac{1}{T_c}\int^{T} (U_1 - U_d)\, dt = U_2. \qquad (12)$$

Регулировочная характеристика этой структуры, как это следует из (12), имеет линейный вид:

$$U_d = U_1 - \frac{T_c}{T} U_2. \qquad (13)$$

Интегрируя (12) в пределах от 0 до T_n, получаем следующее разностное уравнение:

$$U_1\alpha_{n+1} = U_1\alpha_n - \sin\left(\alpha_n - \frac{\pi}{m}\right) + \sin\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right), \qquad (14)$$

где $U_1 = \frac{U_1}{U_m}$.

Коэффициент q определяется выражением:

$$q = 1 - \frac{\cos\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right)}{U_1}. \qquad (15)$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

При регулировании U_d изменением U_1 величина U_2, как это следует из (3) и (13), выбирается из условия

$$U_2 > \frac{\cos\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right)}{2} - \frac{m}{2\pi}\left[1 - \sin\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right)\right], \quad (16)$$

где $U_2 = \frac{U_2}{U_m}$.

В отличие от полностью управляемой схемы, где минимально допустимая величина U_2 определяется для $\alpha = \pi$ [Л. 1], здесь она находится для значения $\alpha = \alpha_2$, которое определим, приравняв производную правой части (16) к нулю:

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg}\frac{m}{\pi} + \frac{\pi}{m}, \quad (17)$$

$$U_{2\min} = 0{,}5\left[\cos\operatorname{arctg}\frac{m}{\pi} - \frac{m}{2\pi}\left(1 - \sin\operatorname{arctg}\frac{m}{\pi}\right)\right]. \quad (18)$$

При регулировании изменением напряжения U_2 к величине U_1 предъявляется требование

$$U_{1\min} > \frac{\cos\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right)}{2}. \quad (19)$$

Зависимость $q(\alpha)$ при полном регулировании U_d $\left(0 < \alpha < \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m}\right)$ изменением уставки U_1 имеет вид:

$$q = \begin{cases} \dfrac{U_2 + \frac{m}{\pi}\sin\frac{\pi}{m}\cos\alpha_0 - \cos\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right)}{U_2 + \frac{m}{\pi}\sin\frac{\pi}{m}\cos\alpha_0 - \cos\left(\alpha_0 + \frac{\pi}{m}\right)}, \\ 0 < \alpha_0 < \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}; \\ \dfrac{U_2 + \frac{m}{2\pi}\left[1 - \sin\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right)\right] - \cos\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right)}{U_2 + \frac{m}{2\pi}\left[1 - \sin\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right)\right]}, \\ \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} < \alpha_0 < \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m}. \end{cases} \quad (20)$$

Эта же зависимость при регулировании изменением напряжения U_2:

$$q = \begin{cases} \dfrac{U_1 - \cos\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right)}{U_1 - \cos\left(\alpha_0 + \frac{\pi}{m}\right)}, & 0 < \alpha_0 < \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}; \\ \dfrac{U_1 - \cos\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right)}{U_1}, & \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} < \alpha_0 < \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m}. \end{cases} \quad (21)$$

Приведенные на рис. 4 кривые, построенные по выражениям (20) и (21) для шестифазного выпрямителя, показывают одинаковую эффективность в смысле быстродействия обоих способов регулирования и наличие только отдельных точек оптимального быстродействия.

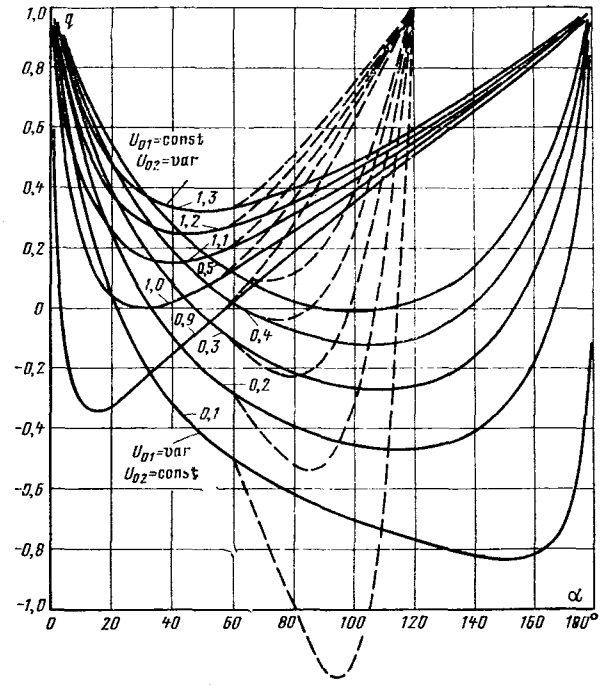


Рис. 4. Зависимость $q(\alpha)$ для трехфазного мостового выпрямителя при регулировании V_d изменением V_1 или V_2.
– – – – полууправляемый режим; ——— полностью управляемый режим.

Для достижения оптимального быстродействия во всем диапазоне регулирования изменение обеих уставок должно производиться в соответствии с условиями:

$$U_1 = \cos\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right); \quad (22)$$

$$U_2 = \begin{cases} \cos\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right) - \frac{m}{\pi}\sin\frac{\pi}{m}\cos\alpha_0, & 0 < \alpha_0 < \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}; \\ \cos\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right) - \frac{m}{2\pi}\left[1 - \sin\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right)\right], \\ \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} < \alpha_0 < \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m}. \end{cases} \quad (23)$$

Таким образом, наличие двух уставок позволяет не только получить устойчивую работу замкнутой системы во всем диапазоне регулирования, но и обеспечить получение переходных процессов конечной длительности.

Структура IV. Эта структура, как отмечалось в [Л. 1], позволяет в диапазоне $0 < \alpha_0 < 2\pi/m$ получить предельное быстродействие. Сигнал на входе интегратора представляет собой разность между выходным напряжением неуправляемого выпрямителя U_{d0} и напряжением U_d. Момент формирования управляемого импульса определяется из условия равенства выходного сигнала интегратора разности между постоянной составляющей напряжения неуправляемого выпрямителя U_{d0}, выделенный фильтром Ф и напряжением уставки U_0. Такт интегрирования описывается соотношением

$$\frac{1}{T_c}\int_0^T (U_{d0} - U_d)\,dt = U_{d0} - U_0. \quad (24)$$

Из (24) следует, что при $T_c = T$ регулировочная характеристика имеет вид $U_d = U_0$. В диапазоне $0 < \alpha < 2\pi/m$ процесс интегрирования всегда начинается в точке естественной коммутации, т. е. интегральная структура работает синхронно

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

с сетью; в этом режиме она обладает одним из достоинств вертикальных систем — предельным быстродействием. Если $\alpha > 2\pi/m$, то процесс интегрирования на каждом последующем такте начинается в момент его окончания на предыдущем. При этом структура теряет свойства синхронных систем и ее быстродействие определяется из разностного уравнения. Найдем разностное уравнение для $m=6$, исходя из того, что при малом m в большей части диапазона $q=0$, а при большом m область полууправляемого режима незначительна.

Разобьем заштрихованную площадку на рис. 2,*г* на две: от α'_n до $\pi/3$ и от 0 до α'_{n+1}, и найдем в этих границах напряжение на входе интегратора: $U=U_{d0}-U_d$. Имеем:

$$\left.\begin{aligned} U_1 &= U_m \sin \omega t; \\ U_2 &= U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right). \end{aligned}\right\} \qquad (25)$$

Из условия работы интегратора следует:

$$\int_{\alpha'_n}^{\pi/3} U_1\, d\omega t + \int_{0}^{\alpha'_{n+1}} U_2\, d\omega t = U_m \sin\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{6}\right), \qquad (26)$$

где $\alpha'_n = \alpha_n - \frac{\pi}{3}$; $\alpha'_{n+1} = \alpha_{n+1} - \frac{\pi}{3}$.

Подставляя (25) в (26), получаем разностное уравнение

$$\cos \alpha_{n+1} = \cos\left(\alpha_n - \frac{\pi}{3}\right) - \sin\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{6}\right). \qquad (27)$$

Коэффициент q равен:

$$q = \frac{\sin\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{3}\right)}{\sin \alpha_0}. \qquad (28)$$

При $\alpha=\pi/3$ и $2\pi/3$ коэффициент q соответственно равен нулю и единице.

Как отмечалось в [Л. 1], для структуры IV можно увеличить диапазон предельного быстродействия до $4\pi/m$ использованием двух каналов управления, один для анодной группы вентилей, второй для катодной с соответствующим съемом выходного сигнала. Можно рекомендовать такое управление для трехфазного мостового преобразователя именно в полууправляемом режиме, так как это позволяет во всем диапазоне регулирования получить предельное быстродействие. Следует отметить, что в такой схеме вследствие неидентичности параметров интеграторов может возникнуть асимметрия управляющих импульсов между вентилями анодной и катодной групп, которая приведет к появлению на выходе выпрямителя гармоники с частотой 150 Гц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Придатков А. Г., Исхаков А. С.** Устойчивость вентильных преобразователей с системой управления интегрального типа. — Электричество, 1979, № 3.
2. **Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. З.** Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959.
3. **Писарев А. Л., Деткин Л. П.** Управление тиристорными преобразователями. М.: Энергия, 1975.
4. **Ибрагимов И. Г., Невзоров В. П., Жолток Л. А.** Однофазный тиристорный стабилизатор переменного напряжения или тока. — Промышленная энергетика. 1973, № 2.

[31.8.1978]

УДК 621.315.615

Влияние формы электродов на условие нарушения устойчивости поверхности воды в электрическом поле

БУРАЕВ Т. К., СЛАНОВ В. М.

Горский сельскохозяйственный институт

Распыление жидкостей в электрическом поле находит широкое распространение в различных технологических процессах (электроокраска, получение заряженных аэрозолей для лечебных целей, аэрозольная обработка растений и т. д.). Установлено, что осуществление мелкодисперсного распыления в электрическом поле без наложения сторонних сил возможно при определенных свойствах распыляемых жидкостей, определяющими среди которых являются удельная электропроводность γ, относительная диэлектрическая проницаемость ε и коэффициент поверхностного натяжения α. На практике часто требуется осуществлять мелкодисперсное распыление жидкостей, представляющих собой различные водные растворы, имеющие высокие значения γ, ε и α, близкие к свойствам воды. Рядом исследований [Л. 1—3] установлено, что вода и ее растворы под действием электрических сил могут образовывать только сравнительно крупные капли. Наблюдаемое мелкодисперсное распыление жидкостей, обладающих высокими значениями γ и ε [Л. 4], позволило предположить, что в случае распыления воды определяющим является коэффициент поверхностного натяжения α. Было показано [Л. 5], что механизм нарушения устойчивости поверхности воды отличается от такового для жидкостей, имеющих существенно меньший коэффициент поверхностного натяжения. Причиной этого является возникающий у поверхности воды коронный разряд, предшествующий нарушению устойчивости поверхности. У жидкостей, обладающих меньшими значениями α, нарушение устойчивости поверхности сопровождается выбросом тонкой струи в месте наибольшей кривизны поверхности, что является необходимым условием мелкодисперсного распыления. В воде образования тонкой струи не происходит, а отрываются относительно крупные капли, так как возникающий до нарушения устойчивости поверхности коронный разряд препятствует росту напряженности поля, а следовательно, и росту давления, обусловленного электрическими силами в месте максимальной кривизны поверхности. Однако в отмеченных исследованиях не учитывалось влияние формы зарядных электродов на условие нарушения устойчивости, которое является важным фактором при конструировании распыляющих устройств. От формы электродов зависит закон изменения напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке, а следовательно, и начальная напряженность у поверхности жидкости. Возможность регулирования начальной напряженности изменением формы электродов позволяет изменять на поверхности жидкости, покрывающей электроды и повторяющей их форму, соотношение между давлением $f_э$, обусловленным электрическими силами и давлением f_α, обусловленным силами поверхностного натяжения.

Представляется целесообразным рассчитать зависимости давлений $f_э$ и f_α для различных форм электродов от характерных параметров.

Расчет начальных напряженностей проводился из условия самостоятельности разряда для напряженностей поля $E < 120 \cdot 10^5$ В/м [Л. 6]:

$$\int_{y_0}^{y_k} \left[\frac{E}{\delta b} - 1\right]^2 dy = \frac{\frac{k}{a}}{\delta b^2}, \qquad (1)$$

где E — напряженность поля в межэлектродном промежутке вдоль самой короткой силовой линии; y_0 — координата точки поверхности электрода; y_k — координата точки межэлектродного пространства, где эффективный коэффициент ионизации

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

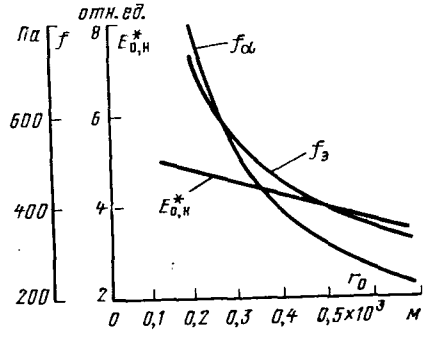


Рис. 1.

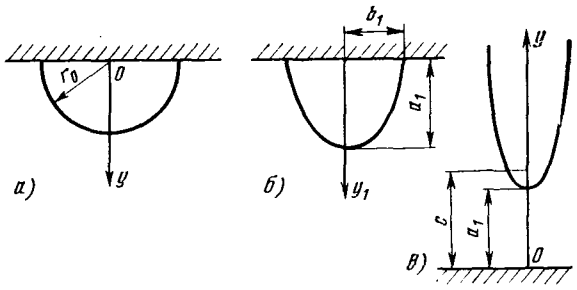


Рис. 2.

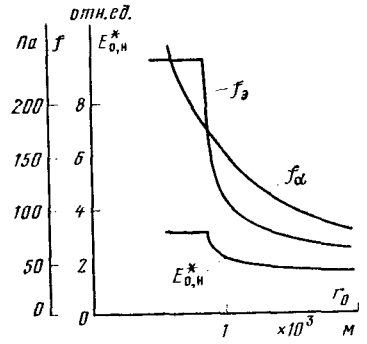


Рис. 3.

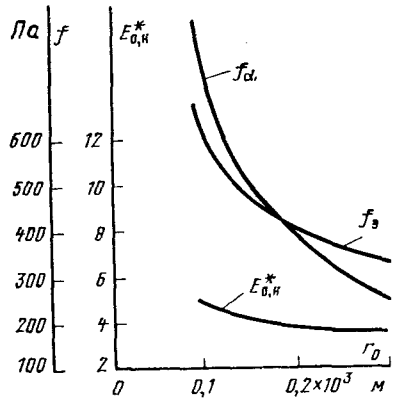


Рис. 4.

равен нулю; δ — относительное давление воздуха; $\frac{k}{a} = 42{,}25 \cdot 10^8$ В²/м; $b = 24{,}5 \cdot 10^5$ В/м.

Условие нарушения устойчивости поверхности жидкости определялось из соотношения $f_э \geqslant f_α$, которое является необходимым для мелкодисперсного распыления [Л. 5]:

$$\frac{\varepsilon_0 E^2_0}{2} \geqslant \frac{\alpha}{R}, \qquad (2)$$

где E_0 — напряженность электрического поля на поверхности жидкости; ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; R — радиус кривизны поверхности жидкости. Коэффициент поверхностного натяжения для воды [Л. 7] принимался равным $\alpha = 74{,}9 \cdot 10^{-3}$ Н/м.

Приведенные ниже значения давления $f_э$ определены для некоторых электродных систем, которыми можно аппроксимировать конструкции, встречающиеся на практике.

Уединенная сфера. Такая задача возникает при исследовании условий распада заряженных капель. Закон изменения напряженности электрического поля при начале отсчета в центре сферы

$$E = \frac{E_0 r^2_0}{r^2}, \qquad (3)$$

где E_0 — напряженность электрического поля на поверхности сферы; r_0 — радиус сферы; r — текущая координата, $r \geqslant r_0$.

Из условия самостоятельности разряда получена зависимость начальной напряженности от радиуса сферы

$$\frac{1}{3}(E^*_{0,н})^2 - 2E^*_{0,н} + \frac{8}{3}(E^*_{0,н})^{1/2} - 1 = \frac{\frac{k}{a}}{\delta b^2 r_0}, \qquad (4)$$

где $E^*_{0,н} = \frac{E_{0,н}}{\delta b}$ — относительное значение начальной напряженности.

Условие нарушения устойчивости поверхности сферической капли воды

$$\frac{\varepsilon_0 E^2_0}{2} \geqslant \frac{2\alpha}{r_0}. \qquad (5)$$

Зависимости давлений $f_э$, $f_α$ и напряженности $E^*_{0,н}$ от радиуса сферы приведены на рис. 1. У сферических капель воды с $r_0 < 0{,}25 \cdot 10^{-3}$ м нарушения устойчивости поверхности не происходит, так как этому предшествует коронный разряд, препятствующий росту напряженности поля у поверхности. Поэтому для капель радиуса $r_0 < 0{,}25 \cdot 10^{-3}$ м условие (5) не выполняется. При $r_0 > 0{,}25 \cdot 10^{-3}$ м условия нарушения устойчивости поверхности капель выполняются, что согласуется с приведенными в [Л. 8 и 9] экспериментальными данными, подтверждающими мелкодисперсное распыление заряженных капель воды при их испарении.

Полусфера на плоскости. В этом случае напряженность поля вдоль оси симметрии (рис. 2,*а*) [Л. 7]

$$E = \frac{E_0}{3}\left(1 + 2\frac{r^3_0}{y^3}\right), \qquad (6)$$

где E_0 — максимальная напряженность поля на поверхности полусферы; y — расстояние от центра полусферы, $y \geqslant r_0$.

Начальная напряженность связана с радиусом полусферы r_0 зависимостью

$$\frac{(E^*_{0,н} - 3)(1 - E^*_{0,н})}{3} + \frac{1}{45}\left[4(E^*_{0,н})^2 - (3 - E^*_{0,н})^3 \sqrt{2E^*_{0,н}(3 - E^*_{0,н})^2}\right] = \frac{\frac{k}{a}}{\delta b^2 r_0}. \qquad (7)$$

Условие нарушения устойчивости поверхности записывается в виде (5). График зависимости $f_э$, $f_α$ и $E^*_{0,н}$ от радиуса

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

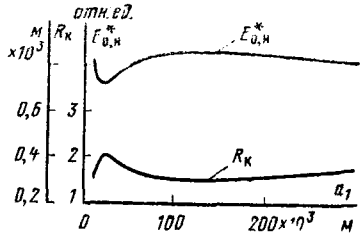


Рис. 5.

полусферы приведен на рис. 3. Расчеты показывают, что нарушение устойчивости поверхности полусферической капли воды может происходить в диапазоне значений $0{,}63\cdot10^{-3}<r_0<0{,}88\cdot10^{-3}$ м. Нижняя граница значений r_0 определяется выполнением условия самостоятельности разряда во всем окружающем пространстве. Верхний предел значений r_0 обусловлен соотношением $f_\alpha > f_э$.

Для выяснения возможности нарушения устойчивости поверхности полусферической капли в некотором сечении плоскостью, перпендикулярной оси y, было получено соотношение

$$F_э \geqslant F_\alpha; \quad 9\pi\varepsilon_0 E^2_0\left(\frac{r^2}{2}-\frac{r^4}{4r^2_0}\right)\geqslant 2\pi\alpha r, \tag{8}$$

где $F_э$ и F_α — электрическая сила и сила поверхностного натяжения, действующие в сечении полусферы плоскостью, перпендикулярной оси y; r — радиус круга, полученного в этом сечении. Для капель радиусом до 10^{-3} м силой тяжести можно пренебречь, так как она значительно ниже, чем F_α.

Анализ зависимости (8) для предельных значений E_0, равных начальным напряженностям, показал, что условие (5) выполняется в диапазоне $0{,}63\cdot10^{-3}$ м$<r_0<0{,}88\cdot10^{-3}$ м раньше, чем условие (8). Сделанные выводы справедливы для сферической капли воды, находящейся в равномерном поле.

Вытянутый полуэллипсоид вращения на плоскости. Для оценки условий нарушения устойчивости поверхности капли воды при ее деформации под действием электрических сил рассмотрим полуэллипсоидальную каплю на плоскости (рис. 2,*б*). Напряженность поля вдоль оси симметрии вытянутого полуэллипсоида вращения описывается зависимостью [Л. 11]:

$$E=\frac{E_0}{f}\left[1+(f-1)\frac{a^3_1}{y^3}\right], \tag{9}$$

где E_0 — максимальная напряженность поля на поверхности полуэллипсоидной капли;

$f=\dfrac{c^3}{a_1b^2_1\left(Ar\,\mathrm{th}\,\dfrac{c}{a_1}-\dfrac{c}{a_1}\right)}$ — коэффициент неоднородности поля;

a_1 — большая полуось эллипсоида; b_1 — малая полуось эллипсоида; $c=\sqrt{a^2_1-b^2_1}$.

Начальная напряженность поля определяется из следующего соотношения, полученного из условия самостоятельности разряда

$$\left(\frac{E^*_{0,н}}{f}-1\right)(1-E^*_{0,н})+\frac{1}{5f^2}\left[(E^*_{0,н})^2(f-1)^2-\right.$$
$$\left.-(f-E^*_{0,н})^3\sqrt{E^*_{0,н}(f-1)(f-E^*_{0,н})^2}\right]=\frac{\frac{k}{a}}{\delta b^2a_1}. \tag{10}$$

Условие нарушения устойчивости поверхности полуэллипсоидальной капли в месте максимальной напряженности поля

$$\frac{\varepsilon_0E^2_0}{2}\geqslant\frac{2\alpha a_1}{b^2_1}. \tag{11}$$

Анализ условия (11) с учетом (10) показывает, что нарушение устойчивости поверхности выполняется в диапазоне значений $0{,}63\cdot10^{-3}$ м$<b_1<0{,}88\cdot10^{-3}$ м лишь при незначительных отклонениях от сферической формы ($a_1\approx1{,}05b_1$). В остальных случаях справедливо условие $f_\alpha > f_э$, т. е. образования тонкой струи не происходит. Сделанные выводы справедливы для вытянутой эллипсоидальной капли, находящейся в равномерном поле.

Коаксиальные цилиндры. Будем считать, что вода равномерно покрывает поверхность внутреннего электрода равномерным слоем, имеющим радиус r_0. Напряженность в межэлектродном промежутке изменяется по закону

$$E=\frac{E_0r_0}{r}, \tag{12}$$

где E_0 — напряженность поля на поверхности жидкости.

Начальная напряженность зависит от радиуса внутреннего цилиндра [Л. 12]

$$(E^*_{0,н})^2-2E^*_{0,н}\ln E^*_{0,н}-1=\frac{\frac{k}{a}}{\delta b^2r_0}. \tag{13}$$

Условие нарушения устойчивости поверхности воды в некоторой точке

$$\frac{\varepsilon_0E^2_0}{2}\geqslant\frac{\alpha}{r_0}. \tag{14}$$

Зависимости параметров $f_э$, f_α, $E^*_{0,н}$ от r_0 приведена на рис. 4, откуда следует, что нарушение устойчивости поверхности может происходить при $r_0>0{,}17\cdot10^{-3}$ м. Для $r_0<0{,}1\cdot10^{-3}$ м нарушению устойчивости поверхности препятствует возникающий раньше коронный разряд.

Круговой полуцилиндр на плоскости. Сечение полуцилиндра плоскостью, перпендикулярной его оси, имеет вид, изображенный на рис. 2,*а*. В этом случае закон изменения напряженности поля вдоль оси y [Л. 10]:

$$E=\frac{E_0}{2}\left(1+\frac{r^2_0}{y^2}\right), \tag{15}$$

где $y\geqslant r_0$.

Выражение для начальной напряженности в зависимости от радиуса цилиндра

$$\left(1-\sqrt{\frac{E^*_{0,н}}{2-E^*_{0,н}}}\right)\left[\frac{1}{2}(E^*_{0,н})^2-\frac{3}{2}E^*_{0,н}+1\right]-$$
$$-\frac{1}{12}(E^*_{0,н})^2\left(1-\sqrt{\frac{(2-E^*_{0,н})^3}{(E^*_{0,н})^3}}\right)=\frac{\frac{k}{a}}{\delta b^2r_0}. \tag{16}$$

Условие (14) в этом случае остается справедливым. Анализ зависимостей $f_э$, f_α и $E^*_{0,н}$ от r_0 показывает, что условие нарушения устойчивости поверхности воды в месте максимальной напряженности поля выполняется для $r_0>0{,}7\cdot10^{-3}$ м. Для $r_0<0{,}71\cdot10^{-3}$ м нарушения устойчивости поверхности не может происходить, так как раньше выполняется условие самостоятельности разряда во всем промежутке. Сделанный вывод справедлив для случая цилиндра в равномерном поле.

Гиперболоид вращения против плоскости. Часто распылительный электрод можно представить в виде гиперболоида вращения (рис. 2,*в*). В этом случае закон изменения напряженности поля вдоль оси симметрии [Л. 13]

$$E=\frac{E_0(c^2-a^2_1)}{c^2-y^2}, \tag{17}$$

где E_0 — напряженность поля у вершины гиперболоида; a_1 — расстояние от плоскости до вершины гиперболоида; c — координата фокуса гиперболоида; y — отсчитывается от плоскости, $a_1\geqslant y\geqslant0$.

Исходя из условия нарушения устойчивости поверхности воды в вершине гиперболоида

$$\frac{\varepsilon_0E^2_0}{2}\geqslant\frac{2\alpha a_1}{c^2-d^2_1} \tag{18}$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

и значений начальной напряженности для различных межэлектродных расстояний и радиусов кривизны поверхности в вершине гиперболоида, были построены зависимости начальной напряженности $E^*_{о,н}$ и критического радиуса кривизны $R_к$, соответствующего начальной напряженности, от межэлектродного расстояния. Кривые этих зависимостей приведены на рис. 5. В области, лежащей выше кривой $R_к$, находятся значения радиусов кривизны, при которых возможно нарушение устойчивости поверхности воды при данных межэлектродных расстояниях. Кривая $E^*_{о,н}$ показывает зависимость от параметра a_1 начальных напряженностей, соответствующих критическим значениям радиусов кривизны в вершине гиперболоида.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Окраска** изделий в электрическом поле/ Под ред. Е. Н. Владычиной и М. М. Гольдберга. М.: Химия, 1966.
2. **Бураев Т. К., Пашин М. М.** Качественная картина распыления жидкости в электрическом поле. — Электричество, 1971, № 4.
3. **Schultze K.** Das Verhalten verschiedener Flüssigkeiten bei der elektrostatischen Zerstäubung. — Zeitschrift fur angewandte Physik, 1961, B. XIII, № 1.
4. **Simm W.** Elektrostatische Feinstzerstäubung von Flussigkeiten.— Chemie — Ing. — Techn., 1969, B. 41, № 8.
5. **Бураев Т. К., Верещагин И. П.** Физические процессы при распылении жидкости в электрическом поле. — АН СССР. Энергетика и транспорт, 1971, № 5, с. 70—79.
6. **Разевиг Д. В.** О начальных напряженностях в однородном и неоднородном электрических полях. — Электричество, 1968, № 6.
7. **Карякин Н. И., Быстров К. Н., Киреев П. С.** Краткий справочник по физике. М.: Высшая школа, 1969.
8. **Doyle A., Moffett D. R., Vonnegut B.** Behavior of Evaporating Electrically Charged Droplets. — Journal of Colloid Science, 1964, № 19.
9. **Abbas M. A., Latham J.** The Instability of Evaporating Charged Drops. — Journal of Fluid Mechanics, 1967, vol. 30, № 4.
10. **Гринберг Г. А.** Избранные вопросы математической теории электричества. М.: АН СССР, 1948.
11. **Блохинцев Д. И., Вул Б. М., Парнас Я. М.** Пробой в сжатом газе при больших давлениях и малых расстояниях. — ЖТФ, 1940, № 5, т. 10.
12. **Основы** электрогазодинамики дисперсных систем/ Верещагин И. П., Левитов В. И., Мирзабекян Г. З., Пашин М. М. М.: Энергия, 1974.
13. **Pulses** in Negative Points — to — Plane Corona/Loeb L. B., Kip A. F., Handson G. G., Bennet W. H. — Phys. Rev., 1941, vol. 60.

[10.3.1978]

УДК 621.319.7.001.24

Экранирующее действие системы заземленных проводов

КОЛЕЧИЦКИЙ Е. С.

Московский энергетический институт

Расширение сети ВЛ СВН и перспектива дальнейшего повышения номинальных напряжений ставят задачу защиты от воздействия сильных электрических полей. В качестве защитных мер обычно рассматривают экраны различной формы [Л. 1], а в [Л. 2] даже учитывается экранирующее влияние растительности (деревьев, кустарников и т. д.). В [Л. 3] в качестве защитного экрана рассматривается сетка из параллельных земле заземленных проводов. Расчеты, выполненные численным способом, показали, что для подстанций напряжением 500 кВ и выше с достаточной для практики точностью можно ограничиться рассмотрением случая внешнего однородного поля.

Ниже получены аналитические выражения, определяющие экранирующий эффект бесконечной сетки и показаны пределы их применимости.

В случае внешнего однородного поля (см. рисунок) формулы для расчета напряженности под проводами в замкнутом виде можно получить при $n=1$ и $n=\infty$, т. е. для одного провода и для бесконечной системы заземленных проводов. Эти два случая позволяют оценить минимальный и максимальный экранирующий эффект.

Вначале рассмотрим случай, когда $n=1$. Заряд на единицу длины провода, наведенный внешним полем,

$$\tau = -\frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\frac{2h}{r}} E_{вн} h, \qquad (1)$$

где $E_{вн}$ — напряженность внешнего поля.

Результирующая напряженность под проводом

$$E_{рез} = E_{вн}\left[1 - \frac{2}{\ln\frac{2h}{r}\left(1 - \frac{y^2}{h^2}\right)}\right]. \qquad (2)$$

Из (2) следует, что на некоторой высоте $y_0 = h\sqrt{1 - \frac{2}{\ln\frac{2h}{r}}}$ результирующая напряженность обращается в нуль. При $y > y_0$ напряженность возрастает. Максимальное и минимальное значения напряженности на поверхности провода соответственно равны:

$$E_{пр} = E_{вн}\left[\frac{h}{r\ln\frac{2h}{r}} \pm 1\right]. \qquad (3)$$

В практических случаях при $r \leqslant 0{,}01h$ имеем $y_0 = (0{,}8—0{,}9)h$, а напряженность у поверхности земли $E_{рез}|_{y=0} = (0{,}5—0{,}7)E_{вн}$. Из сказанного следует, что с помощью одиночных проводов можно добиться снижения напряженности внешнего поля примерно в 2 раза.

Перейдем теперь к случаю бесконечной системы заземленных проводов ($n=\infty$). Расчет проведем с помощью функций комплексного переменного. Комплексный потенциал бесконечного ряда одинаковых зарядов, расположенных над проводящей плоскостью [Л. 4 и 5]:

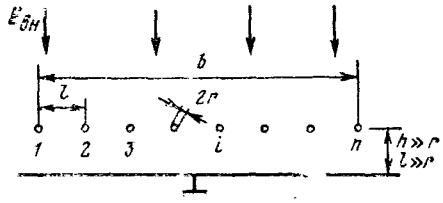
$$W = j\frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{\sin\frac{\pi(z+jh)}{l}}{\sin\frac{\pi(z-jh)}{l}}. \qquad (4)$$

Выделив действительную часть, получим выражение для емкости на единицу длины одного провода:

$$C_0 = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\frac{\operatorname{sh}\frac{2\pi h}{l}}{\operatorname{sh}\frac{\pi r}{l}}}. \qquad (5)$$

Согласно следствию теоремы Гринберга [Л. 6] о потенциале проводника, находившегося во внешнем поле, заряд одного провода

$$\tau = -C_0\varphi_{вн} = -\frac{2\pi\varepsilon_0 E_{вн} h}{\ln\frac{\operatorname{sh}\frac{2\pi h}{l}}{\operatorname{sh}\frac{\pi r}{l}}}. \qquad (6)$$



Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Напряженность электрического поля под проводами можно найти, продифференцировав (4) по z. После дифференцирования, подстановки значения τ из (6) и упрощений получим выражения для E и $E_{рез}$. В итоге для $z=jy$ и $0\leqslant y\leqslant h-r$ (расчетная точка под проводом) получим:

$$E_{рез} = E_{вн}\left[1-\frac{\pi h}{l}\,\frac{\operatorname{sh}\frac{2\pi h}{l}}{\left(\ln\frac{\operatorname{sh}\frac{2\pi h}{l}}{\operatorname{sh}\frac{\pi r}{l}}\right)\operatorname{sh}\frac{\pi(h+y)}{l}\operatorname{sh}\frac{\pi(h-y)}{l}}\right]; \quad (7)$$

для точек, расположенных между проводами $\left(z=\frac{l}{2}+jy\right)$

$$E_{рез} = E_{вн}\left[1-\frac{\pi h}{l}\,\frac{\operatorname{sh}\frac{2\pi h}{l}}{\left(\ln\frac{\operatorname{sh}\frac{2\pi h}{l}}{\operatorname{sh}\frac{\pi r}{l}}\right)\operatorname{ch}\frac{\pi(h+y)}{l}\operatorname{ch}\frac{\pi(h-y)}{l}}\right]. \quad (8)$$

Так как для больших значений аргумента справедливо соотношение $\operatorname{sh} x\approx\operatorname{ch} x\approx e^x/2$, то при выполнении условия $\pi(h-y)/l\geqslant 3$ в (7) и (8) можно заменить гиперболические функции экспонентами. Это приводит к упрощениям, в результате которых получим:

$$E_{рез} = E_{вн}\left[1-\frac{2\pi h}{l\ln\frac{\operatorname{sh}\frac{2\pi h}{l}}{\operatorname{sh}\frac{\pi r}{l}}}\right]. \quad (9)$$

Выражения (7)—(9) дают максимальный экранирующий эффект для сетки с шагом l. Очевидно при $b\gg h$ формула (9) будет давать хорошее приближение и в случае конечного числа проводов.

При сооружении экранирующих сеток должно соблюдаться условие отсутствия короны на экранирующих проводах. Это условие будет выполнено, если максимальная напряженность на проводе будет меньше начальной. Если сетка имеет конечное число проводов, то наибольшие заряды будут сосредоточены на крайних проводах.

Примеры расчетов. Ниже излагаются результаты некоторых численных расчетов, при выполнении которых было принято $h=3$ м, $r=2$ мм, внешнее поле однородное с напряженностью $E_{вн}$.

1. Бесконечная система проводов ($n=\infty$).

l, м	0,25	0,5	1,0	3,0
C_0, пФ/м	0,71	1,34	2,4	4,72
$E_{рез}/E_{вн}$	0,038	0,089	0,19	0,44

При $l=3$ м значение $E_{рез}/E_{вн}=0{,}44$ имеет место для $y/h\leqslant 0{,}6$. Приведенные данные показывают, что с помощью сетки из заземленных проводов можно получить высокую степень экранировки при относительно больших расстояниях между проводами.

2. Сетка из конечного числа проводов. Результаты расчетов приведены в табл. 1 и 2. Из этих расчетов следует, что с увеличением ширины сетки b экранирующий эффект возрастает и уже при $b\geqslant h$ достаточно близко совпадает с экранирующим эффектом бесконечной сетки. Так, при $b=h$ имеем

$$\left.\frac{E_{рез}}{E_{вн}}\right|_{b=h}\approx 1{,}7\left.\frac{E_{рез}}{E_{вн}}\right|_{b=\infty},$$

а при $b=3h$

$$\left.\frac{E_{рез}}{E_{вн}}\right|_{b=3h}\approx 1{,}3\left.\frac{E_{рез}}{E_{вн}}\right|_{b=\infty}.$$

Таблица 1

Экранирующее действие заземленных проводов при $l=1$ м

Характеристика сетки	Отношение $E_{рез}/E_{вн}$			
	в середине сетки		под крайним проводом	
	$y=1{,}8$ м	$y=0{,}6$ м	$y=1{,}8$ м	$y=0{,}6$ м
$b=1$ м, $n=2$	0,44	0,59	0,47	0,60
$b=3$ м, $n=4$	0,32	0,41	0,41	0,49
$b=4$ м, $n=5$	0,29	0,36	0,40	0,47
$b=5$ м, $n=6$	0,27	0,32	0,39	0,46
$b=6$ м, $n=7$	0,26	0,29	0,38	0,44
$b=9$ м, $n=10$	0,24	0,25	0,38	0,43

Таблица 2

Экранирующее действие заземленных проводов при $b=3$ м

Характеристика сетки	Отношение			
	в середине сетки		под крайним проводом	
	$y=1{,}8$ м	$y=0{,}6$ м	$y=1{,}8$ м	$y=0{,}6$ м
$l=0{,}5$ м, $n=7$	0,16	0,29	0,32	0,40
$l=0{,}75$ м, $n=5$	0,24	0,35	0,40	0,44
$l=1{,}0$ м, $n=4$	0,32	0,41	0,41	0,49

Как следует из приведенных данных, для оценочных расчетов можно принять, что отношение $E_{рез}/E_{вн}$ пропорционально расстоянию между проводами сетки l. Это справедливо уже при $b\geqslant h$.

3. Для сетки с $l=1$ м и разным числом проводов были подсчитаны допустимые значения напряженности внешнего поля, определенные по условию появления короны на проводах сетки. При расчетах было принято, что допустимая напряженность на 10% ниже той, при которой возникает корона. Начальная напряженность при расчетах была принята равной $E_0=54$ кВ/см. Результаты расчетов приведены ниже:

n	1	2	4	6	10
$E_{вн,\,доп}$, кВ/м	25,7	31,5	36,7	38,2	39,8

Уменьшение расстояния между проводами при $n\geqslant 2$ будет приводить к увеличению допустимой напряженности внешнего поля. Этот же эффект будет давать увеличение диаметра провода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кайданов Ф. Г.** Расчет экранов для защиты персонала от воздействия электрического поля на подстанциях сверхвысокого напряжения. — Труды НИИПТ. Л.: Энергия, 1974, вып. 20.

2. **Александров Г. Н.** Перспективы повышения номинальных напряжений и пропускной способности электропередач переменного тока. ВЭЛК, доклад № 2.06, 1977.

3. **Кайданов Ф. Г., Перельман Л. С.** Экранирующие навесы для защиты персонала подстанций сверхвысокого напряжения. — Электрические станции, 1975, № 1.

4. **Фукс Б. А., Шабат Б. В.** Функции комплексного переменного и некоторые их приложения. М.: ГИФМЛ, 1959.

5. **Бухгольц Г.** Расчет электрических и магнитных полей. М.: Изд.-во иностр. лит., 1961.

6. **Гринберг Г. А.** Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. Изд. АН СССР, 1948.

[29.6.1978]

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

УДК 621.318.1.3.013

Потери в цилиндрическом магнитном экране при осевой симметрии поля

ЦЕЙТЛИН Л. А.

Ленинград

Потери в магнитных и электромагнитных экранах, обусловленные индуктированными в них вихревыми токами, могут быть вызваны внешними помехонесущими полями и полями источников, расположенных внутри экрана. Основной интерес представляет, очевидно, второй случай. Применительно к цилиндрическому электромагнитному экрану из слабомагнитного хорошо проводящего материала соответствующая задача решена в [Л. 1 и 2]. В статье рассматривается другой крайний случай, когда экран выполнен из материала с высокой магнитной проницаемостью ($\mu \gg \mu_0$). При решении задачи предполагается, что поле, создаваемое источниками (контурами, катушками), осесимметрично и ось его симметрии совпадает с осью цилиндра (рис. 1).

Потери в экране существенным образом зависят от характера распределения вихревых токов по сечению экрана. Поэтому рассмотрим сначала электромагнитное поле в проводящих стенках экрана. Если толщина стенки Δ существенно меньше других размеров экрана, что на практике всегда имеет место, то электромагнитное поле в металле можно рассматривать как плоскую электромагнитную волну в плоском проводящем слое, распространяющуюся перпендикулярно к границам слоя (рис. 2).

В плоской волне векторы напряженности электрического и магнитного поля взаимно перпендикулярны, а их величины определяются выражениями:

$$\dot{E} = \dot{E}_1 e^{-ku} + \dot{E}_2 e^{ku}; \tag{1}$$

$$\dot{H} = \dot{H}_1 e^{-ku} + \dot{H}_2 e^{ku}, \tag{2}$$

причем для проводящей среды $k = \sqrt{j\omega\mu\gamma}$, где ω — угловая частота изменения поля; μ и γ — абсолютная магнитная проницаемость и удельная проводимость среды. Постоянные $\dot{E}_1$, $\dot{E}_2$, $\dot{H}_1$, $\dot{H}_2$, связанные зависимостями

$$\dot{E}_1 = \frac{k}{\gamma}\dot{H}_1, \quad \dot{E}_2 = -\frac{k}{\gamma}\dot{H}_2, \tag{3}$$

должны быть найдены из условий задачи.

В рассматриваемом случае, когда экран выполнен из материала с высокой магнитной проницаемостью, магнитный поток, создаваемый источником поля, почти полностью замыкается внутри экрана и в его стенках, а во внешнюю область, окружающую экран, выходит лишь незначительная часть потока. Отсюда следует, что напряженность электрического поля на наружной поверхности экрана существенно меньше, чем на внутренней [1]. Поэтому, упрощая задачу, можно принять, что напряженность электрического поля на наружной поверхности экрана (при $u = \Delta$ на расчетной схеме рис. 2) равна нулю. Формулы (1)—(3) приводят при этом к соотношению

$$\dot{H} = \frac{\gamma}{k \operatorname{th} k(\Delta - u)}\dot{E} \tag{4}$$

и, в частности, при $u = 0$, что соответствует внутренней поверхности экрана:

$$\dot{H}_0 = \frac{\gamma}{k \operatorname{th} k\Delta}\dot{E}_0. \tag{5}$$

Последнее выражение, дающее связь между комплексами действующих значений векторов $\mathbf{E}_0$ и $\mathbf{H}_0$, позволяет выразить среднее значение Π_0 вектора Пойнтинга в какой-либо точке внутренней поверхности экрана через действующее значение E_0 напряженности электрического поля, а в силу равенства $\dot{E} = -j\omega\dot{A}$ и через действующее значение A_0 векторного потенциала $\mathbf{A}$ в той же точке:

$$\Pi_0 = \operatorname{Re}(\dot{E}_0^* \dot{H}_0) = DA_0^2, \tag{6}$$

где

$$D = \gamma\Delta\omega^2 \operatorname{Re}\frac{1}{k\Delta \operatorname{th} k\Delta} = \gamma\Delta\omega^2 \frac{1}{\xi}\frac{\operatorname{sh}\xi - \sin\xi}{\operatorname{ch}\xi - \cos\xi}, \tag{7}$$

$$\xi = \sqrt{2\omega\mu\gamma}\,\Delta. \tag{8}$$

При малых значениях ξ ($\xi \ll 1$), соответствующих предположению о распределении магнитного потока по толщине проводящего слоя, близком к равномерному, последнее выражение упрощается:

$$D = \frac{\gamma\Delta}{3}\omega^2. \tag{9}$$

Из формулы (6) видно, что для определения потерь в экране необходимо иметь выражения для векторного потенциала A_0 на внутренней поверхности экрана. Эти выражения могут быть получены из приведенных в [Л. 3] решений соответствующей краевой задачи [2].

Если поле внутри экрана создается двумя одинаковыми токами I, протекающими по двум симметрично расположенным круговым контурам радиуса $r_0 < R$, лежащим в плоскостях $z = \pm z_0$ ($z_0 < h$), то на боковой поверхности цилиндра ($r = R$, $|z| \leqslant h$)

$$A_0 = C\left[a_0 + \sum_{p=2}^{\infty} a_p \cos(\nu_p z)\right], \tag{10}$$

а на основаниях ($z = \pm h$, $r \leqslant R$)

$$A_0 = C\sum_{q=1}^{\infty} b_q J_1(\lambda_q r), \tag{11}$$

где

$$C = \frac{2\mu_0 I r_0}{R}; \tag{12}$$

$$a_0 = \frac{r_0}{4h}; \quad a_p = \frac{I_1(\nu_p r_0)}{I_0(\nu_p R)}\frac{\cos(\nu_p z_0)}{\nu_p h}; \tag{13}$$

$$b_q = \frac{1}{\lambda_q R}\frac{J_1(\lambda_q r_0)}{J_1^2(x_q)}\frac{\operatorname{ch}(\lambda_q z_0)}{\operatorname{sh}(\lambda_q h)}; \tag{14}$$

$\nu_p = \frac{p\pi}{2h}$ ($p = 2, 4, 6, \ldots$), I_0 и I_1 — модифицированные функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка; $\lambda_q = x_q/R$, x_q — корень уравнения $J_0(x) = 0$; J_0 и J_1 — функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка.

Для катушки прямоугольного сечения $s = 2l(R_2 - R_1)$ (рис. 1), заменив в формулах (10) и (11) ток I на

$$dI = \frac{Iw}{s}dr_0 dz_0,$$

где w — число витков катушки, и интегрируя полученные выражения по z_0 от 0 до l и по r_0 от R_1 до R_2, вновь придем к формулам вида (10) и (11), но с иными значениями коэффициентов C, a_0, a_p, b_q:

$$C = \frac{2\mu_0 I w R^2}{s}; \tag{15}$$

[1] В силу осевой симметрии всей системы напряженность электрического поля, имеющая только азимутальную составляющую $E_\varphi = E$, в любой точке пропорциональна магнитному потоку, сцепляющемуся с симметрично расположенным круговым контуром, проходящим через эту точку.

[2] При формулировке граничных условий задачи экран рассматривался как имеющий бесконечно большую магнитную проницаемость.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

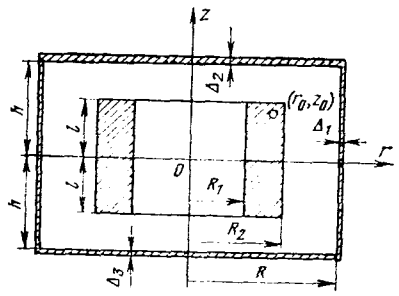


Рис. 1.

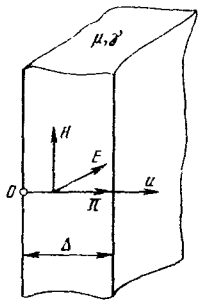


Рис. 2.

$$a_0 = \frac{R^3_2 - R^3_1}{12R^3} \cdot \frac{l}{h}; \tag{16}$$

$$a_p = \frac{l}{h} \frac{V_{2p} - V_{1p}}{(\nu_p R)^3 I_0 (\nu_p R)} \frac{\sin(\nu_p l)}{\nu_p l}; \tag{17}$$

$$b_q = \frac{U_{2q} - U_{1q}}{(\lambda_q R)^4 J^2_1 (x_q)} \frac{\operatorname{sh}(\lambda_q l)}{\operatorname{sh}(\lambda_q h)}, \tag{18}$$

где V_{1p}, V_{2p}, U_{1q}, U_{2q} — значения функций $V(T) = \int_0^T tI_1(t)\,dt$, $U(T) = \int_0^T tI_1(t)\,dt$ при $T = \nu_p R_1$, $\nu_p R_2$, $\lambda_q R_1$, $\lambda_q R_2$ соответственно.

Функции U и V табулированы [Л. 2]. В некоторых частных случаях формулы (15)—(18) упрощаются.

Так, для соленоида ($R_1 = R_2 = R_0$):

$$C = \frac{\mu_0 I w R}{l}; \tag{19}$$

$$a_0 = \frac{1}{4} \frac{lR^2_0}{hR^2}; \quad a_p = \frac{lR_0}{R^2} \frac{1}{\nu_p h} \frac{I_1(\nu_p R_0)}{I_0(\nu_p R)} \frac{\sin(\nu_p l)}{\nu_p l}; \tag{20}$$

$$b_q = \frac{R_0}{\lambda^2_q R^2 R} \frac{J_1(\lambda_q R_0)}{J^2_1(x_q)} \frac{\operatorname{sh}(\lambda_q l)}{\operatorname{sh}(\lambda_q h)}; \tag{21}$$

для плоской катушки ($l = 0$):

$$C = \frac{\mu_0 I w R^2}{(R_2 - R_1) h}; \tag{22}$$

$$a_0 = \frac{R^3_2 - R^3_1}{12R^3}; \quad a_p = \frac{V_{2p} - V_{1p}}{(\nu_p R)^3 I_0 (\nu_p R)}; \tag{23}$$

$$b_q = \frac{U_{2q} - U_{1q}}{(\lambda_q R)^4 J^2_1 (x_q)} \frac{\lambda_q h}{\operatorname{sh}(\lambda_q h)}. \tag{24}$$

В случае катушки весьма малого поперечного сечения со средним радиусом R_0 можно пользоваться формулами (12)—(14), заменив в них $2I$ на Iw, r_0 на R_0 и положив $z_0 = 0$.

Представляя полные потери в экране в виде суммы трех слагаемых, соответствующих цилиндрической части экрана (S_1) и двум его основаниям (S_2, S_3), можно, исходя из (6), написать:

$$P = P_1 + P_2 + P_3, \tag{25}$$

где P_1, P_2, P_3 — интегралы от (6) по соответствующим частям поверхности S.

Потери P_1 найдем, подставляя в формулу

$$P_1 = \int_{S_1} \Pi_0 dS = 2\pi D_1 \int_{-h}^{+h} A^2_0 dz$$

вместо A_0 выражение (10), которое можно рассматривать как разложение A_0 в ряд Фурье по переменной z (D_1 — значение D при $\Delta = \Delta_1$). Применяя теорему Парсеваля, имеем:

$$\int_{-h}^{+h} A^2_0 dz = 2hC^2 \left(a^2_0 + \frac{1}{2} \sum_{p=2}^{\infty} a^2_p \right),$$

и, следовательно,

$$P_1 = 4\pi RhC^2 D_1 \left(a^2_0 + \frac{1}{2} \sum_{p=2}^{\infty} a^2_p \right). \tag{26}$$

Две других составляющих потерь найдем, используя для A_0 выражение (11). В силу соотношения

$$J'_1(x) = J_0(x) - \frac{J_1(x)}{x}$$

величины $x_q = \lambda_q R$, входящие в (14) и представляющие собой корни уравнения $J_0(x) = 0$, являются в то же время и корнями уравнения $J_1(x) + xJ'_1(x) = 0$. Отсюда следует, что ряд (11) можно рассматривать как обобщенный ряд Фурье — Бесселя (ряд Дини). При этом, как известно [Л. 4], функции $J_1(\lambda_q r)$ ортогональны на промежутке $(0, R)$:

$$\int_0^R rJ_1(\lambda_n r) J_1(\lambda_m r)\,dr = 0 \text{ при } m \neq n,$$

а интеграл

$$\int_0^R rJ^2_1(\lambda_q r)\,dr = \frac{R^2}{2} \frac{J^2_1(x_q)}{x^2_q}.$$

Используя эти соотношения, нетрудно, получить для величины

$$P_2 = \int_{S_2} \Pi_0 dS = 2\pi D_2 \int_0^R rA^2_0 dr$$

выражение:

$$P_2 = \pi C^2 R^2 D_2 \sum_{q=1}^{\infty} b^2_q \frac{J^2_1(x_q)}{x^2_q}, \tag{27}$$

где D_2 — значение D при $\Delta = \Delta_2$.

Выражение для P_3 получается из (27) заменой D_2 на D_3, где D_3 — значение D при $\Delta = \Delta_3$. Полные потери в экране определяются из (25).

Приложение. Формулы (10) и (11) для векторного потенциала были получены в [Л. 3] путем решения краевой задачи, в которой тангенциальная составляющая H_0 напряженности магнитного поля на внутренней поверхности экрана принималась равной нулю. Такое решение соответствует предположению, что экран выполнен из материала с нулевой удельной проводимостью и бесконечной магнитной проницаемостью. Реальные условия, очевидно, отличаются от указанных, поэтому истинные значения векторного потенциала на внутренней поверхности экрана и потери в экране отличаются от найденных при условии $H_0 = 0$. Оценить это отличие можно, если при решении упомянутой краевой задачи в качестве граничного условия использовать для H_0 значение, определяемое формулой (5), которая в силу соотношения $\dot{E}_0 = -j\omega\dot{A}_0$ может быть записана в виде

$$\dot{H}_0 = \frac{-j\omega\gamma}{k \operatorname{th} k\Delta} \dot{A}_0.$$

В общем случае уточненное таким путем решение приводит к весьма громоздким и трудно анализируемым результатам. Поэтому мы ограничимся рассмотрением сравнительно простого случая, когда аксиальный и радиальный размеры

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

экрана приблизительно одинаковы. В этом случае можно, как это сделано, например в [Л. 5], заменить цилиндрический экран соответствующим сферическим, а катушку — диполем (или, что то же, сферической катушкой), после чего, представив уточненное значение векторного потенциала на внутренней поверхности экрана в виде суммы $\dot{A}_0$ и поправки $\dot{A}'_0$, учитывающей отличие H_0 от нуля, для рассматриваемой расчетной схемы найдем:

$$\dot{A}_0 = \frac{3}{8\pi}\mu_0 p \frac{\sin\theta}{R^2};$$

$$\dot{A}'_0 = -\frac{3}{16\pi}\mu_0 p \frac{\sin\theta}{R^2}\frac{\mu_0}{\mu}\frac{kR}{\operatorname{th} k\Delta},$$

где p — магнитный момент катушки; θ — полярный угол сферической системы координат. Таким образом,

$$\frac{\dot{A}'_0}{\dot{A}_0} = -\frac{\mu_0}{2\mu}\frac{kR}{\operatorname{th} k\Delta}.$$

Это выражение определяет относительную погрешность, вносимую неучетом тангенциальной составляющей H_0. Погрешность, как и следовало ожидать, уменьшается с увеличением толщины Δ, приводящим к уменьшению H_0. При малых значениях $k\Delta$ можно принять $\operatorname{th} k\Delta \approx k\Delta$, и тогда

$$\frac{\dot{A}'_0}{\dot{A}_0} \approx -\frac{\mu_0}{2\mu}\frac{R}{\Delta}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мастрюков Л. А.** Электромагнитное экранирование мощных реакторов без стали. — Электричество, 1968, № 1.
2. **Цейтлин Л. А.** Влияние электромагнитного экрана на параметры экранируемой катушки. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1972, № 6, с. 87—95.
3. **Цейтлин Л. А.** Индуктивность цилиндрической катушки с цилиндрическим магнитным экраном. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1977, № 4, с. 179—183.
4. **Лебедев Н. Н.** Специальные функции и их приложения. М.: ГИТТЛ, 1953.
5. **Каден Г.** Электромагнитные экраны. М.: Госэнергоиздат, 1957.

[15.8.1978]

УДК 621.313.323.016.25-533.7

О регулировании реактивной мощности крупного синхронного двигателя

ОРЕЛ О. А.

УГПИ Тяжпромэлектропроект

Режимы работы синхронного двигателя (СД), подключенного к шинам понизительной подстанции вместе с другими потребителями, работающими с переменной нагрузкой, рассмотрены в [Л. 1], где показано, что минимальные потери электроэнергии в узле нагрузки имеют место при работе СД в таком режиме, при котором его реактивный ток в каждый момент времени пропорционален по значению и противоположен по знаку реактивному току остальных потребителей. Однако формулы для вычисления оптимальных значений токов требуют знания таких параметров СД, которые имеются лишь в расчетных материалах разработчиков машины на заводе-изготовителе и обычно отсутствуют у заказчика. Опыт расчета и наладки систем регулирования реактивной мощности показал, что это обстоятельство существенно затрудняет практическое использование предложенного в [Л. 1] метода, и поэтому ниже приводится вывод более простых формул, позволяющих ограничиться использованием лишь тех параметров СД, которые приводятся в каталогах и справочной литературе.

В качестве исходной принята схема узла нагрузки, приведенная в [Л. 1]. Согласно [Л. 2 и 3] потери энергии в СД можно представить в следующем виде:

$$P_д = P_{const} + P_a + P_q, \qquad (1)$$

где P_{const} — постоянные потери; P_a — потери, зависящие от активной мощности; P_q — потери, зависящие от реактивной мощности, причем

$$P_q = Д_1 \frac{Q}{Q_н} + Д_2 \frac{Q^2}{Q_н}, \qquad (2)$$

где $Д_1$, $Д_2$ — величины, зависящие от параметров СД; Q, $Q_н$ — текущее и номинальное значения опережающей реактивной мощности СД.

В соответствии с установившейся практикой будем принимать отстающий реактивный ток со знаком плюс. При этом условии опережающую реактивную мощность, входящую в формулу (2), можно выразить через реактивный ток СД и напряжение на шинах узла на нагрузки следующим образом:

$$Q = -I_{р.д} U_ш \sqrt{3}. \qquad (3)$$

Подставив выражение (3) в формулу (2), получим:

$$P_q = -\frac{Д_1}{Q_н} I_{р.д} U_ш \sqrt{3} + \frac{Д_2}{Q^2_н}(I_{р.д} U_ш \sqrt{3})^2. \qquad (4)$$

Используя выражение (9) из [Л. 1], найдем суммарные потери в СД и элементах питающей сети:

$$P_Σ = P_с + P_д = 3r_{ф.с}\left(\sum_{i=1}^{n} I_{a(i)} + I_{а.д}\right)^2 +$$

$$+ 3r_{ф.с}\left(\sum_{i=1}^{n} I_{pi} + I_{р.д}\right)^2 + P_{ж.с} - \sqrt{3}U_ш \frac{Д_1}{Q_н} I_{р.д} +$$

$$+ 3U^2_ш \frac{Д_2}{Q^2_н} I^2_{р.д}. \qquad (5)$$

Приняв те же допущения, что и в [Л. 1] и исследовав полученную функцию (5) на экстремум, найдем, что ее минимум, т. е. минимум потерь энергии в узле нагрузки, достигается при реактивном токе СД

$$I_{р.д} = -\lambda_р \sum_{i=1}^{n} I_{pi} + I^*, \qquad (6)$$

где

$$\lambda_р = \frac{B}{A+B};\ I^* = \frac{C}{A+B}; \qquad (7)$$

$$A = 6U^2_ш \frac{Д_2}{Q^2_н};\ B = 6r_{ф.с};\ C = \sqrt{3}U_ш \frac{Д_1}{Q_н}. \qquad (8)$$

Из выражений (6)—(8) видно, что для определения значения реактивного тока СД, обеспечивающего минимум потерь энергии узла нагрузки, достаточно располагать параметрами $Д_1$ и $Д_2$, приводимыми в справочной литературе [Л. 2 и 3]. Реализация полученного уравнения (6) обеспечивается структурной схемой регулирования, приведенной в [Л. 1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Орел О. А.** Регулирование реактивной мощности, крупного синхронного двигателя. — Электричество, 1976, № 3.
2. **Указания** по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях. М.: Энергия, 1974.
3. **Справочник** по электроснабжению промышленных предприятий/ Под ред. Федорова А. А., Сербиновского Г. В. М.: Энергия, 1973, ч. 1.

[15.5.1978]

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

Хроника

УДК [621.3.016.4:658.562].061.3

Четвертое Всесоюзное научно-техническое совещание по качеству электрической энергии

(19—21 сентября 1978 г., Винница)

Совещание было организовано Главниипроектом и Энергетическим институтом им. Г. М. Кржижановского Минэнерго СССР, Институтом электродинамики АН УССР, Минэнерго УССР и ПЭО «Винницаэнерго», Винницким политехническим институтом, Украинским республиканским и Винницким областным правлениями НТОЭ и ЭП.

В работе совещания участвовало около 200 представителей научно-исследовательских и проектных институтов, научно-производственных объединений и заводов, министерств, энергосистем, городских электрических сетей, высших учебных заведений, а также Минэнерго СССР, Госплана УССР, Академии наук УССР, местных партийных и советских органов.

На совещании обсуждались технические, экономические, организационные и другие аспекты проблемы повышения качества электроэнергии (КЭ). По основным вопросам программы были заслушаны генеральные и обобщающие доклады, а также проведены дискуссии. Каждый обобщающий доклад составлялся на основе опубликованных тезисов 15—20 докладов отдельных авторов и авторских коллективов; в этих докладах также формулировались направления дискуссий.

Совещание открыл проректор по научной работе Винницкого политехнического института, доктор техн. наук **Карпов Е. А.** С докладом «Народнохозяйственная и научная значимость проблемы качества электроэнергии» выступил чл.-корр. АН УССР, директор Института электродинамики АН УССР **Шидловский А. К.**

В докладе было отмечено, что около 25% потерь электроэнергии обусловлено пониженным ее качеством; 80% ущерба, связанного с некачественной электроэнергией, относится к технологической составляющей. **Шидловский А. К.** подчеркнул, что этот ущерб имеет неявный характер и не всегда привлекает должное внимание.

По мнению докладчика, дальнейшей разработки и развития требуют методы оптимизации значений показателей качества электроэнергии (ПКЭ), теоретические вопросы стабилизации параметров электрических сетей с учетом значений ПКЭ, способы оценки ущерба от отклонений частоты, разработки измерительных приборов и комплексов, а также методов и средств улучшения КЭ.

Доктор техн. наук **Константинов Б. А.** (Ленинградский инженерно-экономический институт им. П. Тольятти) в генеральном докладе «Влияние качества электроэнергии на эффективность использования ее в народном хозяйстве» подчеркнул, что со времени первого совещания по КЭ, состоявшегося в 1961 г. в Москве, достигнуты серьезные успехи в разработке теоретических аспектов проблемы, однако практические результаты в промышленных, городских и сельских сетях ощущаются в недостаточной мере; электропромышленность не выпускает серийно многих устройств для улучшения КЭ. Докладчик обратил внимание на важность совместного рассмотрения и решения вопросов надежности электроснабжения и КЭ с учетом эффективного использования электроэнергии. Важным фактором повышения КЭ является увеличение материальной заинтересованности персонала электротехнических служб.

Обобщающий доклад «Ущерб от низкого качества электроэнергии» сделал канд. техн. наук **Михайлов В. В.** (ВНИИПИэнергопром, Москва). Он отметил, что по предварительным оценкам величина ущерба отличается от стоимости средств минимизации его не менее, чем на один порядок. Действенное улучшение КЭ возможно лишь при выделении специальных госбюджетных средств, для обоснования величины которых необходима разработка корректных методик оценки народнохозяйственного ущерба, обусловленного ухудшением ПКЭ. **Михайлов В. В.** предложил обсудить следующие вопросы: о целесообразности введения обобщенной интегральной оценки ущерба, связанного с низким КЭ и удельных показателей ущерба; об оценке влияния КЭ на протекание технологических процессов; о способах снижения нагрузки в аварийных ситуациях.

В дискуссии по докладам **Константинова Б. А.** и **Михайлова В. В.** отмечалась необходимость стимулирования рациональной компенсации реактивной мощности (**Киреев А. П.**, НИИконденсаторостроения, Серпухов), разработки руководящих материалов по определению значений ПКЭ на стадии проектирования, организации серийного выпуска технических средств для улучшения ПКЭ (канд. техн. наук **Рабинович М. Л.**, Киевское отделение института «Укр. Тяжпромэлектропроект»).

Доктор техн. наук **Либкинд М. С.** (ЭНИН им. Г. М. Кржижановского) обратил внимание на необходимость изучения влияния изменений частоты на потери электроэнергии. Важности изучения флуктуационных изменений напряжения и связи КЭ с надежностью энергосистем посвятил свое выступление доктор техн. наук **Гусейнов Ф. Г.** (АзНИИэлектроэнергетики). Доктор техн. наук **Мамошин Р. Р.** (МИИТ) говорил о необходимости разработки методики расчета ущерба, связанного с несимметрией напряжения в тяговых сетях, а также об особенностях использования конденсаторных батарей в сетях железнодорожного транспорта. Представитель ПЭО «Винницаэнерго» **Мариняк С. И.** поделился опытом внедрения новой техники, в частности гидроаккумулирующей станции, в энергосистеме.

Генеральный доклад «Организационные вопросы обеспечения качества электрической энергии в сетях общего назначения» представил **Копытов Ю. В.** (Госэнергонадзор Минэнерго СССР). Было отмечено, что энергосистемами проводится некоторая работа по обеспечению ПКЭ в соответствии с ГОСТ 13109-67. В 84 энергосистемах контролируются только отклонения напряжения, в 8 — значения всех ПКЭ; однако в 8 энергосистемах контроль ПКЭ не организован. Основная причина слабой организации контроля ПКЭ — отсутствие серийно выпускаемых специальных приборов. Докладчик предложил штрафовать потребителей, ухудшающих КЭ; уделять больше внимания разработке и внедрению приборов контроля ПКЭ; улучшить обучение персонала методам контроля ПКЭ.

С обобщающим докладом по той же теме выступил канд. техн. наук **Белло С. Б.** (Ленинградская кабельная сеть). Излагая краткое содержание 19 докладов, тезисы которых были опубликованы, он подверг критике «Временные методические указания по контролю КЭ», пользование которыми весьма затруднено из-за отсутствия специальных приборов, сложности и громоздкости методик измерения, а также новое издание «Правил пользования электроэнергией». Он отметил, что в указанных документах не регламентирована материальная ответственность поставщика и потребителя за низкое КЭ, не определено допустимое количество некондиционной энергии. **Белло С. Б.** предложил обсудить эти вопросы, а также вопросы сбора и статистической обработки информации об экономическом ущербе, вопросы разработки проектов ПКЭ для действующих электрических сетей и обучения персонала электротехнических служб методике контроля ПКЭ.

Выступая в дискуссии, **Мусников Л. И.** (Иркутскэнерго) отметил снижение надежности работы электрооборудования, в частности электродвигателей, в условиях низкого КЭ, а также появление значительных погрешностей счетчиков индукционной системы при несинусоидальных режимах. **Мусников Л. И.** предложил разработать шкалу штрафов и надбавок за несоблюдение норм ГОСТ 13109-67.

Говоря о проблеме регулирования напряжения в электрических сетях сельскохозяйственного назначения, **Ковтюх Н. А.** (УО «Сельэнергопроект», Киев) предложил проектировать их только с трансформаторами, оборудованными РПН; переклю-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

чатели РПН, по мнению выступавшего, целесообразно выносить наружу, чтобы в случае выхода из строя устройства РПН трансформатор мог быть оставлен в работе.

Доктор техн. наук **Либкинд М. С.** (ЭНИН им. Г. М. Кржижановского) сформулировал основные положения системного подхода к вопросу улучшения КЭ. Системный подход применим, в первую очередь, при решении вопросов нормализации режима напряжений по основной частоте; улучшение других показателей напряжения должно обеспечиваться с помощью локальных мероприятий и технических средств. **Зейлидзон Е. Д.** (Главтехуправление Минэнерго СССР) остановился на вопросе введения дополнительных генерирующих мощностей для обеспечения качества электроэнергии по частоте, а также на необходимости повышения степени компенсации реактивной мощности в энергосистемах. Для реализации последнего мероприятия требуется увеличить выпуск конденсаторных установок.

Канд. техн. наук **Железко Ю. С.** выступил с докладом «Методика контрольных измерений КЭ и аппаратура». Подчеркнув, что в последние годы появилось должное понимание проблемы, **Железко Ю. С.** отметил, что решение вопросов улучшения КЭ сдерживается отсутствием приборов контроля ПКЭ. Не всегда удовлетворительна эксплуатация устройств РПН и регуляторов батарей конденсаторов. В 1976 г. ВНИИЭ совместно с Латвглавэнерго, Институтом электродинамики АН УССР и Ждановским металлургическим институтом были разработаны «Временные методические указания по контролю КЭ», переданные для внедрения в 29 энергосистем. По мнению докладчика, анализ КЭ возможен на основе статистической информации; в связи с этим необходима разработка информационно-измерительной системы, содержащей блок статистической обработки информации. По предложению автора доклада вынесены на обсуждение основные вопросы контроля КЭ: разработка аппаратуры для контроля, выбор пунктиров контроля и установление продолжительности измерений.

С обобщением 25 докладов по теме «Измерение ПКЭ» выступил доктор техн. наук **Баркан Я. Д.** (Латвглавэнерго, Рига), который обратил внимание на необходимость уточнения терминологии контроля КЭ и подчеркнул перспективность разработки информационно-измерительных комплексов, а также новых методов оценки ПКЭ, основанных на учете «дозы» ПКЭ за интервал времени, в течение которого проявляются характерные воздействия этого показателя. По мнению докладчика, заслуживает внимания использование магнитофонных лент для записи высших гармоник токов и напряжения. Эти вопросы было предложено обсудить в дискуссии.

Канд. техн. наук **Зыкин Ф. А.** (Ульяновский политехнический институт) предложил в качестве критерия оценки нелинейных искажений кривых токов и напряжений рассматривать мощность искажения и высказался за скорейшую разработку соответствующих измерительных приборов. Доктор техн. наук **Таранов С. Г.** (Институт электродинамики АН УССР) рассказал об информационно-измерительной системе для контроля ПКЭ. **Нейман В. В.** (Иркутский политехнический институт) подчеркнул важность правильного выбора интервала дискретизации и объема выборки при вероятностном исследовании ПКЭ в энергосистемах. Если интервал дискретизации оказывается меньше интервала корреляции, то во многих случаях ошибка оценки ПКЭ становится статистически устойчивой.

Канд. техн. наук **Липский А. М.** (Ждановский металлургический институт) отметил, что процесс зрительного восприятия имеет энергетическую сущность, в связи с чем допустимость колебаний напряжения целесообразно определять по значению энергии огибающей кривой мгновенных значений напряжения, т. е. по «дозе миганий». Необходимость создания методики определения ущерба, обусловленного низким КЭ, методики выполнения измерений ПКЭ обосновала канд. техн. наук **Никифорова В. Н.** (ВНИИЭ). При разработке этих документов нужно руководствоваться ГОСТ 8002-71, а также изданными Минприбором «Едиными методическими указаниями по созданию методик выполнения измерений».

Доктор техн. наук **Куренный Э. Г.** (Макеевский инженерно-строительный институт) представил разработанный метод моделирования сети с учетом динамических свойств электроприемников, а также некоторые результаты использования этого метода. Он отметил, что инерционность электроприемников предопределяет возможность снижения требований к нормативным значениям ПКЭ. В выступлении **Музыченко А. Д.** (Институт электродинамики АН УССР) отмечена необходимость разработки методов проведения измерений КЭ и их рационального объема и создания единого прибора для измерения интегральных значений ПКЭ. По мнению выступавшего, в электрических сетях с высшими гармоническими необходимо измерять не только действующие значения гармоник, но и действующие значения токов прямой, обратной и нулевой последовательностей; это позволит наиболее точно оценить ущерб, обусловленный низким КЭ.

Канд. техн. наук **Аберсон М. Л.** (Академия коммунального хозяйства им. Памфилова) рассказал об особенностях взаимоотношений энергосбыта с электроснабжающими организациями по вопросам обеспечения потребителей электроэнергией требуемого качества и о разработанном специальном дополнении к договору о поставке электроэнергии.

Канд. техн. наук **Сорокин В. М.** (ЭНИН им. Г. М. Кржижановского) представил генеральный доклад «Технические средства повышения качества напряжения». Докладчик остановился на способах обеспечения требуемого КЭ по всем показателям, кроме частоты. В качестве основных средств улучшения КЭ рассмотрены фильтры высших гармонических, симметрирующие устройства, реакторы с вращающимся магнитным полем, статические источники реактивной мощности, мощные сетевые стабилизаторы и регуляторы напряжения. Показано, что вследствие недостаточного использования АРПН в сетях 110—500 кВ, а также отсутствия такого регулирования на трансформаторах 35/10 кВ наблюдаются недопустимые отклонения напряжения в сетях 10—0,4 кВ. Указано, что эффективными средствами повышения КЭ и обеспечения компенсации реактивной мощности являются названные выше корректирующие устройства; стоимость таких устройств оказывается значительно ниже, чем стоимость реконструкции электрических сетей. В заключение докладчик информировал о состоянии разработки технических средств по улучшению КЭ в СССР и за рубежом (Англия, Бельгия, США, Япония, Швеция).

Обобщающий доклад «Технические средства повышения качества энергии в части напряжения» сделал канд. техн. наук **Кузнецов В. Г.** (Институт электродинамики АН УССР). Излагая основные положения, посвященные указанной теме, докладчик обратил внимание на отсутствие серийно выпускаемых средств улучшения КЭ, что существенно сдерживает темпы решения проблемы и приводит к значительному народнохозяйственному ущербу. Основой для создания серийных технических средств могут служить разработки отдельных организаций: управляемые реакторы с вращающим магнитным полем, фазные сдвоенные стабилизирующие реакторы, управляемые реакторы с поперечным подмагничиванием (ЭНИН им. Г. М. Кржижановского), управляемые статические компенсаторы (Московский энергетический и Горьковский политехнический институты), фильтрокомпенсирующие устройства (ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект», Ждановский металлургический институт, Институт электродинамики АН УССР), фильтросимметрирующие устройства (Институт электродинамики АН УССР, Омский институт инженеров железнодорожного транспорта), устройства для регулирования батарей конденсаторов и РПН трансформаторов (Одесский политехнический институт) и др. **Кузнецов В. Г.** предложил обсудить особенности применения средств многоцелевого назначения в электрических сетях с нелинейными, резкопеременными, несимметричными и однофазными нагрузками.

В обсуждении проблемы создания технических средств повышения качества напряжения принял участие доктор техн. наук **Тайц А. А.** (Институт проблем управления), отметивший необходимость широкого внедрения статических компенсирующих устройств, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с синхронными компенсаторами. Доктор техн. наук **Кулинич В. А.** (Горьковский политехнический институт) подчеркнул целесообразность применения в электрических сетях с резкопеременной нагрузкой ферромагнитных устройств, снижающих колебания и несимметрию напряжений. **Бессарабов Л. Я.** (Алма-Атинский институт инженеров железнодорожного транспорта) сформулировал требования к средствам улучшения КЭ, устанавливаемым в сетях электрифицированного железнодорожного транспорта. На сложность и специфичность внедрения технических средств в взрыво- и пожароопасных условиях шахт обратил внимание **Островский А. А.** (Донецк). Доктор техн. наук **Мамошин В. Р.** (МИИТ) указал на специфические особенности компенсации реактивной мощности в тяговых электрических сетях. Особенностям снижения несинусоидальности и колебаний напряжения в электрических сетях с обжимными прокатными станами посвятил свое выступление канд. техн. наук **Иванов В. С.** (ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект»).

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

С генеральным докладом «Оптимизационные методы и критерии повышения качества электроэнергии» выступил доктор техн. наук **Жежеленко И. В.** (Ждановский металлургический институт). Докладчик обобщил задачи повышения КЭ и сформулировал условия, при которых эти задачи целесообразно рассматривать как оптимизационные. На основании анализа функций экономического ущерба он сделал заключение, что задача регулирования напряжения в большом числе случаев является оптимизационной, в том числе в диапазоне допустимых значений отклонения напряжения. Задачи снижения несинусоидальности, несимметрии и колебаний напряжения оказываются часто техническими, значения соответствующих показателей КЭ должны быть снижены до допустимых по техническим соображениям пределов. Аналогично при проектировании технических средств улучшения КЭ не во всех случаях имеется необходимость оптимизации решений; нужно учитывать рекомендации, вошедшие в расчетную и проектную практику и являющиеся следствием ранее выполненных решений оптимизационных задач. Указано на насущную потребность в серийно выпускаемых средствах улучшения КЭ.

Обобщающий доклад «Оптимизация качества электрической энергии» сделал канд. техн. наук **Аввакумов В. Г.** (Винницкий политехнический институт). Он отметил, что все доклады по рассматриваемому вопросу можно классифицировать на несколько групп: посвященные выбору оптимальных средств улучшения КЭ; определению оптимальных параметров их, а также оптимизации отдельных ПКЭ или их комплекса; методам одноцелевой и многоцелевой оптимизации. Отмечено, что с математической точки зрения задачи выбора оптимальных параметров средств повышения КЭ и показателей КЭ относятся в большинстве случаев к задачам одно- или многопараметрического нелинейного программирования.

В общей дискуссии были затронуты в основном методологические вопросы повышения КЭ. Канд. техн. наук **Багиев Г. Л.** (Ленинградский инженерно-экономический институт им. П. Тольятти) выступил с предложением уточнить терминологию в области КЭ. **Слепов Ю. В.** (Ждановский металлургический институт) высказал мысль о нецелесообразности создания АСУ КЭ. Эту точку зрения поддержал **Середенко А. Ф.** (Минэнерго УССР). **Божко В. М.** (Киевское отделение института «Укр. Тяжпромэлектропроект») говорил о необходимости скорейшей организации серийного выпуска средств улучшения КЭ. **Берлинский Ю. Н.** (ПО «Союзтехэнерго») сообщил о создании при Минэнерго СССР координационного Совета по проблеме комплексного управления качеством электроэнергии.

Проект решения был представлен председателем редакционной комиссии совещания доктором техн. наук **М. С. Либкиндом** (ЭНИН им. Г. М. Кржижановского). В единогласно принятом постановлении отмечено, что для скорейшего решения проблемы повышения качества электроэнергии необходимы капитальные вложения в создание резервов мощности в энергосистемах, а также на развитие электрических сетей. Совещание обратилось с просьбой к Минприбору СССР о разработке измерительных приборов для контроля ПКЭ и организации их серийного производства и к Минэнерго и Минэлектротехпрому СССР о рассмотрении потребности энергетики в трансформаторах 35 кВ с РПН, в синхронных компенсаторах, управляемых батареях конденсаторов, в управляемых реакторах и других видах оборудования для улучшения КЭ.

Рекомендовано разработать: отраслевые стандарты на методы контроля ПКЭ; методические пособия для персонала энергосбытов по контролю ПКЭ; отраслевые стандарты на допустимые значения ПКЭ в точках раздела балансовой принадлежности сетей и в центрах питания; положение о премировании и иных формах поощрения персонала ПЭС и персонала, обслуживающего электроустановки потребителей, за поддержание ПКЭ в нормированных пределах; дополнение к действующим «Правилам пользования электрической и тепловой энергией» с целью учета требований нормализации КЭ.

В рекомендациях совещания подчеркнута первостепенная важность реализации практических мероприятий, направленных на решение проблемы КЭ. Отмечена также необходимость дальнейшего продолжения научно-исследовательских работ по основным аспектам проблемы.

Доктор техн. наук ЖЕЖЕЛЕНКО И. В.

УДК 621.3.064.4.061.3

Четвертый семинар по физике гашения дуги в выключателях высокого напряжения

(27—30 июня 1978 г., Москва)

На четвертом семинаре, организованном Научно-исследовательским центром по испытанию высоковольтной аппаратуры Минэнерго СССР, были широко представлены результаты исследований комплексной проблемы гашения дуги отключения в электрических цепях, полученные в различных организациях. В программе семинара можно выделить следующие разделы: исследование пробивного напряжения дугового промежутка и остаточных токов; определение влияния различных конструктивных решений дугогасителей и степени интенсивности воздействия на характеристики дугового разряда и вид математических моделей дуги; анализ механизмов формирования геометрических размеров ствола дуги; исследование режимов цепи с электрической дугой.

Пробивное напряжение остаточного ствола дуги в основном исследовалось экспериментальными методами.

Шилиным Н. В. (НИЦ ВВА) представлены результаты впервые проведенных измерений свободной восстанавливающейся электрической прочности (СВЭП) для маломасляного выключателя ВМП-10-20. Показано, что кривые СВЭП, имеющие начальный участок относительно медленного роста от некоторого значения U_0 и резкое возрастание через $(70\div200)\times10^6$ с после нуля, практически не меняются при скоростях нарастания зондирующего импульса $(1\div5)\cdot10^9$ В/с. С увеличением отключаемого тока, который изменялся от 130 А до 12 кА, и длительности дуги, которая достигла $30\cdot10^{-3}$ с, возрастает значение U_0, уменьшается время начального участка и возрастает скорость резкого нарастания СВЭП.

Получено, что для тока 12 кА, длительности дуги 20×10^{-3} с кривые СВЭП расположены существенно выше нормируемых кривых восстанавливающегося напряжения данного режима.

Для масляного выключателя ВМПЭ-10 и воздушного выключателя ВВН-110 **Курочкиным А. К., Никуевым Ю. А., Шилиным Н. В.** (НИЦ ВВА) проведено измерение остаточных токов в синтетической схеме, которая обеспечивала в нуле тока значение производной $di/dt=16{,}6\cdot10^6$ А/с. Остаточный ток в ВВН-10 при производной напряжения на дуге $du/dt\leqslant0{,}57\cdot10^9$ В/с затухает за время примерно $30\cdot10^{-6}$ с с максимальным значением около 7 А ($t_m=1\cdot10^{-6}$ с).

Для значения $du/dt=(0{,}64\div0{,}94)\cdot10^9$ В/с остаточный ток после прохождения через максимум плавно нарастает со скоростью 10^6 А/с. Для значений $du/dt=(0{,}6\div0{,}64)$ В/с переход в режим больших токов происходит скачком в момент времени $(20\div28)\cdot10^{-6}$ с. Аналогичный характер повторные зажигания имеют место и для ВМПЭ-10 при $I_{откл}=1$ кА, $t_д=26\cdot10^{-3}$ с, $du/dt=(0{,}5\div0{,}75)\cdot10^9$ В/с. Авторы объясняют его наличием недуговой стадии разряда с ионным током при отсутствии эмиссии с катода.

Борисов Р. К., Будович В. Л., Кужекин И. П. (МЭИ) представили результаты измерения СВЭП в искровом проме-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

жутке после протекания тока через канал разряда и через взрывающуюся проволочку. Получено, что для второго случая электрическая прочность на начальной стадии может в несколько раз превосходить СВЭП для первого случая. Заполнение канала песком мало влияет на начальные участки СВЭП и приводит к снижению прочности для больших отрезков времени.

Электрический пробой нагретых газов — воздуха, аргона, гелия — экспериментально исследован **Даутовым Г. Ю., Гайсиным Ф М., Гизатуллиной Ф. А.** (КАИ им. А. Н. Туполева). Для статического пробоя получено подтверждение закона Пашена. Для импульсного пробоя в геллии и аргоне при температурах $T=370 \div 2070$ К, межэлектродных промежутках $l=10^{2} \div 10^{-3}$ м, давлении $P=5 \cdot 10^{2} \div 10^{5}$ Н·м$^{-2}$ получена существенная зависимость пробивного напряжения от скорости нарастания переднего фронта импульса, изменяемой в опытах от $4 \cdot 10^{6}$ до $3 \cdot 10^{8}$ В/с.

Перцевым А. А., Гусевой Л. Г., Куликовым А. Е. (ВЭИ им. В. И. Ленина) были доложены результаты испытания вакуумного управляемого высоковольтного (100 кВ) разрядника, который устойчиво поджигается при напряжении от 4 до 130 кВ и удерживает после пропускания тока 20 кА восстанавливающееся напряжение 100÷120 кВ, прикладываемое через $(20 \div 100) \cdot 10^{-6}$ с.

Значительное место в программе семинара было отведено докладам о новых конструктивных решениях аппаратов, о расширении способов воздействия на дугу и исследованиях ее характеристик в таких условиях.

Агафонов Г. Е., Крижанский С. М., Тарасова В. К., Янова Т. В. (ПО «Электроаппарат») исследовали новый способ гашения дуги в высоковольтных выключателях путем воздействия на опорные пятна дуги потока газа, вдуваемого сквозь пористые газопроницаемые электроды. Экспериментально показана возможность гашения дуги переменного тока при токах до 20 кА и напряжении 20 кВ в воздухе и элегазе. Определен расход газа, необходимый для гашения дуги и защиты электродов.

Буянтуевым С. Л., Вишневским Ю. И., Капланом Г. С., Кукековым Г. А. (ЛПИ им. М. И. Калинина) проанализировано гашение дуги в элегазе для различных схем продольного дутья. Выявлены характерные особенности работы и оптимальные геометрические размеры.

В докладе **Ветюковой Л. С., Каплана Г. С., Кукекова Г. А., Саввиной Л. М.** (ЛПИ) представлены зависимости скорости движения дуги по параллельным электродам и напряжения на дуге от тока и индукции магнитного поля для воздуха и элегаза.

Калачев В. Б. исследовал характеристики турбулентности при движении дуги по параллельным электродам.

Азизовым Э. А., Мозолиным А. В., Рябцевым Г. В., Сафоновым Ю. С., Ягновым В. А. (ИАЭ им. И. В. Курчатова) проведен анализ гашения дуги во взрывном размыкателе постоянного тока, в котором на дугу вблизи изоляционной стенки воздействовал поток парафина со скоростью 10^{3} м/с. Получена падающая эмпирическая зависимость мгновенного значения скорости роста напряжения на дуге от мгновенного значения тока при перераспределении тока в параллельную ветвь.

В докладе **Ахмерова Н. А., Годонюка В. А.** (ИАЭ) приведены результаты экспериментов с сильноточной дугой (до 50 кА) при воздействии газовых потоков высокого давления. Получены скорости роста напряжения на дуге до $(2 \div 5) \times 10^{6}$ В/с, значение напряжения на дуге до 1,7 кВ, которое остается практически постоянным в течение $(1 \div 3) \cdot 10^{-3}$ с.

Результаты исследования гашения дуги переменного тока 50÷120 кА в трансформаторном масле представили **Шилин Н. В., Игнатко В. П.** (НИЦ ВВА), **Фрейдин В. А.** (Сибэлектротяжмаш). На основе экспериментальных данных, полученных на макетах турбогенераторов, разработан метод расчета аварийного повышения давления, основанный на использовании только одного эмпирического параметра (произведения коэффициента газообразования на газовую постоянную).

В ряде сообщений на семинаре рассматривались вопросы уточнения динамических моделей дуги.

Крижанским С. М., Яновой Т. В. (ПО «Электроаппарат») предложена модель дуги для газовых выключателей с камерами двустороннего дутья с симметричной и несимметричной геометрией сопл. Отмечается, что в случае несимметричного дутья дуга характеризуется двумя постоянными времени.

На основании результатов, полученных при исследовании воздушных выключателей при токах в десятки килоампер, **Капланом В. В.** и **Гончаром В. С.** (ЛПИ) сделан вывод о необходимости дополнения описания дуги уравнением для непроводящего газа внутри дутьевого сопла.

Эксперименты по определению динамических характеристик дуги проведены с помощью нового метода, основанного на переходе от быстрого уменьшения тока вблизи нуля к практически постоянному току.

Наумкиным И. Е. (СибНИИЭ) предложена модель дуги отключения для высоких скоростей роста восстанавливающегося напряжения, учитывающая и ионизационную неравновесность плазмы.

В докладе **Егорова В. М., Мотовилова В. В., Новикова О. Я.** (КПтИ им. В. В. Куйбышева) проанализированы условия, при которых интегральная модель электрической дуги может быть представлена в виде обыкновенного дифференциального уравнения. Разработана методика адаптивного моделирования с «частичным» поиском структуры для случая, когда имеют место возмущения от стационарного режима.

Синкевичем О. А., Шевченко А. Л. (МЭИ) предпринята попытка оценить зависимость характерного времени изменения энергии дугового ствола от составляющих мощности теплоотвода — теплопроводности, конвекции, излучения и турбулентного смещения. Оценки проводились с целью определения предельной отключающей мощности выключателя.

Оживленную дискуссию на семинаре вызвали доклады, посвященные исследованию механизмов формирования конфигурации и геометрических размеров дугового ствола. В последнее время работы данного направления получили значительное развитие в смежных областях — в электродуговом подогреве газа, плазменной технике. Наблюдается процесс накопления экспериментальных данных, разработки методов исследования и предпринимаются первые попытки анализа конкретных задач. Определение условий гашения или устойчивого горения дуги в электрической цепи, как правило, проводится при описании дуги обыкновенными дифференциальными уравнениями. При определенных ограничениях, накладываемых на электрический режим, например для случая питания дуги от источника тока, удается провести исследование при описании дуги в частных производных и выяснить закономерности установления геометрических размеров ствола дуги.

Случай перехода от цилиндрической формы к винтовой, наблюдающийся при превышении током некоторого значения и при наложении внешнего продольного магнитного поля, теоретически исследовался **Синкевичем О. А.** (МЭИ). На основе уравнения движения, использованного для определения распределения давления по радиусу, и уравнения энергии, играющего основную роль, получено решение для стационарного случая. Исходная система затем линеаризирована на неоднородном стационарном фоне, построено решение нестационарной системы и определены критерии устойчивости. При этом для определения самосогласованным образом формы возмущенной границы и оси симметрии ствола автор использует ступенчатую аппроксимацию проводимости от температуры.

Кулаковым П. А., Новиковым О. Я. (КПтИ) с помощью интегрального метода обобщенных сил и потоков проанализирована устойчивость режимов цепей для некоторых случаев динамической стабилизации электрической дуги — дуги в поперечном магнитном поле, дуги с самоустановлением длины электрическими пробоями, дуги в бегущем магнитном поле. Для определения коэффициентов, входящих в уравнения, разработана экспериментальная методика, основанная на периодическом возмущении длины дуги внешним магнитным полем. Получены критерии, позволяющие оценить влияние параметров цепи, пробивного напряжения, тока и индукции магнитного поля на нарушение условий устойчивости режимов горения дуги.

Процессы в колебательном разрядном контуре, содержащем дугу с изменяющимся диаметром, проанализированы в докладе **Заруди М. Е.** (МИРЭА). На основе предложенного автором уравнения импульсной дуги и уравнения цепи получено приближенное аналитическое решение, позволяющее определить изменение частоты колебаний, огибающей и декремента затухания тока и напряжения, а также зависимость сечения от времени. По этой методике совместно с **Каменской В. П.** проведены расчеты сильноточной импульсной дуги, показавшие удовлетворительное совпадение с экспериментом.

Азизов Э. А., Ахмеров Н. А., Беликов В. Н., Лепер Д. П., Шилин Н. В., Ягнов В. А. (ИАЭ, НИЦ ВВА) рассмотрели процесс перераспределения тока при коммутации цепи с индуктивным накопителем энергии. Ток перераспределяется из размыкателя с удлиняющейся дугой в шунтирующую прово-

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ АЛЕКСАНДРОВ

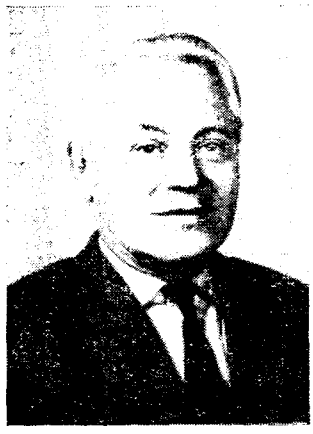
(К 70-летию со дня рождения)

В сентябре 1978 г. исполнилось 70 лет со дня рождения заведующего сектором перспективных разработок Всесоюзного научно-исследовательского и проектно-технологического института электроизоляционных материалов (ВНИИЭИМ) проф. Н. В. Александрова.

Н. В. Александров после окончания в 1930 г. Казанского государственного университета непрерывно работает в области электрической изоляции: сначала в ВЭИ им. В. И. Ленина, а с 1974 г. во ВНИИЭИМ.

В 1938 г. Н. В. Александров защитил кандидатскую диссертацию, а в 1943 г. докторскую. В этот период им была разработана надежная система изоляции для электробура. За эту работу Н. В. Александров (совместно с А. П. Островским) был в 1941 г. удостоен Государственной премии СССР.

Начиная с 1950 г., Н. В. Александров руководит разработкой и совершенствованием предложенной им прогрессивной термореактивной изоляции



МОНОЛИТ, применяемой в настоящее время на 12 крупных предприятиях отрасли и дающей народному хозяйству страны многомиллионный экономический эффект.

Так, например, применение изоляции МОНОЛИТ взамен традиционной микалентной на заводе «Сибэлектротяжмаш» позволило повысить мощность турбогенератора типа ТВФ-100 со 100 тыс. до 120 тыс. кВт, что дает экономию на каждом генераторе около 1 млн. руб. при повышении его эксплуатационной надежности. Двигатели для всех электровозов и пригородных поездов, поставляемые в Финляндию, ПНР и НРБ, изготавливаются только с изоляцией МОНОЛИТ. Габариты шахтных трансформаторов с изоляцией МОНОЛИТ в 2,5 раза меньше, чем трансформаторов прежних типов.

Н. В. Александров — автор 36 печатных трудов и 25 изобретений. Он ведет большую общественную работу по распространению научных знаний.

За плодотворную деятельность Н. В. Александров награжден орденами Ленина, Трудового Красного Знамени, «Знак Почета» и медалями СССР.

Группа товарищей

лочку, для сопротивления которой принята экспоненциальная зависимость от вложенной энергии. В координатах «безразмерная плотность тока и безразмерная индуктивность контура» получена граница области коммутации, за которой коммутация невозможна, так как из-за слишком большой плотности тока рост сопротивления взрывающейся проволочки обгоняет рост сопротивления размыкателя.

В докладе **Якунина В. Н.** (КПтИ) приведены результаты обработки на ЭВМ данных при горении дуги с изменяющейся длиной за счет шунтирования. В результате статической оценки получена функция распределения двумерного вектора состояния.

Авдониным А. В., Буйновым А. Л., Егоровым В. Г., Поздняковым К. А., Пузырийским Г. С., Серяковым К. И. (ВЭИ) исследована дуга отключения в элегазовых и воздушных выключателях путем построения модели по результатам коммутационных испытаний. Показано, что элегазовые выключатели по сравнению с воздушными характеризуются гораздо более сильной зависимостью постоянной времени и мощности потерь от сопротивления дуги. Для воздушного выключателя ВНВ исследованы режимы неудаленных коротких замыканий.

Представленные на семинаре доклады показывают, что для исследования режимов гибридных электродуговых систем, когда совместно с электромагнитными процессами необходимо проводить рассмотрение и комплекса явлений в электродуговом разряде, в различных научных коллективах разрабатывается широкий набор методов, которые являются взаимодополняющими или имеют общие области применения.

Кулаков П. А.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Афанасьев В. В., Бертинов А. И., Будзко И. А., Веников В. А., Глебов И. А., Ефремов И. С., Иванов-Смоленский А. В., Ипатов П. М., Костенко М. В., Ларионов В. П., Лидоренко Н. С., Мамиконянц Л. Г. (главный редактор), **Меерович Э. А., Мучник Г. Ф., Нетушил А. В., Рабинович С. И., Слежановский О. В., Совалов С. А., Тареев Б. М., Толстов Ю. Г., Федосеев А. М., Шаталов А. С.**

Научные редакторы: Б. Н. Евсеев (редактор отдела), А. Б. Желдыбин

Адреса редакции: 103012, Москва, К-12, Б. Черкасский пер., 2/10. Телефон 294-24-80.
101000, Москва, Главный почтамт, абонентный ящик № 648
Адрес для телеграмм: МОСКВА, 12, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Технический редактор Н. Н. Хотулева

Сдано в набор 15.01.79 | Подписано в печать 07.03.79 | Т-06126 | Формат 60×90¹/₈ | Печать высокая
Усл. печ. л. 10,0 | Уч.-изд. л. 12,14 | Тираж 8650 экз. | Заказ 9

Издательство «Энергия», 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10
Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Совалов С. А., Беркович М. А., Комаров А. Н., Вовченко И. И., Сегура Х., Попов Ю. И., Арбузов А. Ф., Анисимова Е. И. — Экспериментальная цифровая система автоматического регулирования частоты и активной мощности ЕЭС СССР 1

Будзко И. А., Славин Р. М. — Электрификация животноводства 7

Арзамасцев Д. А., Мардер Л. И., Морозова Н. С., Мызин А. Л. — Многофакторные модели прогнозирования показателей развития электрических сетей энергосистем 13

Александров Г. Н., Герасимов Ю. А., Дж. Каррара — Оценка надежности работы воздушной изоляции подстанций СВН 17

Джуварлы Ч. М., Бейдуллаев М. А., Муфид-заде Н. А. — Влияние характеристики вентильного разрядника на ограничение перенапряжений в автотрансформаторах 21

Тарнижевский М. В., Кривцов Б. И., Городничев А. В. — Алгоритмы автоматизированного проектирования городских электрических сетей напряжением до 1000 В 26

Марквардт К. Г., Косарев Б. И., Косолапов Г. Н., Чернов Ю. А. — Расчет токораспределения при коротких замыканиях в тяговых сетях 2×25 кВ 30

Борцов Ю. А., Иванов Г. М., Новиков В. Н., Смольников А. П., Хмелев В. В. — Исследование и оптимизация взаимосвязанных систем электропривода испытательных стендов механических трансмиссий . . . 34

Поляков Л. М., Херунцев П. Э. — Оптимальное управление динамическими процессами в электроприводах с упругими связями 40

Овчинников И. Е., Лебедев Н. И., Гращенков В. Т. — Выбор параметров управляемых бесконтактных двигателей постоянного тока с беззубцовым статором . . . 45

ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

Валеев Х. С. — Процессы, возникающие в высоковольтном фарфоре при длительном воздействии постоянного напряжения и температуры 49

Бронштейн А. М., Быковец Ю. Я. — Исследования дугогасящей способности смесей элегаза с азотом и гелием для автодутьевых отключающих устройств высокого напряжения 52

Корольков В. Л., Фурса О. И. — Отключающая способность межконтактного промежутка синхронизированного взрывного дугогасящего устройства 55

Князь А. И. — Некоторые топологические вопросы теории электронных схем 57

Фришман В. С., Прохорова Г. А. — О расчете асинхронного генератора с двумя статорными обмотками . . 60

СООБЩЕНИЯ

Придатков А. Г., Исхаков А. С. — Устойчивость и быстродействие полууправляемых выпрямителей с системой управления интегрального типа 63

Бураев Т. К., Сланов В. М. — Влияние формы электродов на условие нарушения устойчивости поверхности воды в электрическом поле 66

Колечицкий Е. С. — Экранирующее действие системы заземленных проводов 69

Цейтлин Л. А. — Потери в цилиндрическом магнитном экране при осевой симметрии поля 71

Орел О. А. — О регулировании реактивной мощности крупного синхронного двигателя 73

ХРОНИКА 74

CONTENTS

An Experimental Digital System for Automatically Controlling Frequency and Real Power Flow in the United Power Grid of the USSR — **S. A. Sovalov, M. A. Berkovitch, A. N. Komarov, I. I. Vovchenko, H. Segura, U. I. Popov, A. F. Arbuzov, E. I. Anisimova** . . . 1

Electrification of Animal Husbandry — **I. A. Budzko, R. M. Slavin** 7

Multifactorial Models for Forcasting the Parameters of Power System Network Development — **D. A. Arzamastsev, L. I. Marder, N. S. Morozova, A. L. Mizin** 13

Appraising the Reliability of Air Insulation in EHV Substations — **G. N. Alexandrov, U. A. Gerasimov, J. Karrara** 17

How Lightning Arrester Characteristics Limit Voltage Surges on Autotransformers — **C. M. Djuvarli, M. A. Beydullayev, N. A. Mufid-zade** 21

Algorithms for Automatized Design of Urban Networks of up to 1000 V. — **M. V. Tarnidjevski, B. I. Krivtsov, A. V. Gorodnichev** 26

Calculating Current Distribution for Faults on 2×25 kV Traction Networks — **K. G. Markvardt, B. I. Kosarev, G. N. Kosolapov, U. A. Chernov** 30

Optimization of Coupled Electric Drive Systems for Mechanical Transmission Test Set-Ups — **U. A. Bortsov, G. M. Ivanov, V. N. Novikov, A. P. Smolnikov, V. V. Khmelev** 34

Optimum Control of Dynamic Processes in Electric Drives With Flexible Coupling — **L. M. Polyakov, P. E. Kheruntsev** 40

Selection of the Parameters of Controlled Contactless D. C. Motors With a Toothless Stator. — **I. E. Ovchinnikov, N. I. Lebyedev, V. T. Graschenkov** 45

FROM OPERATING EXPERIENCE

Processes Arising in HV Porcelain Insulation for Continuous Application of a Constant Voltage and Temperature — **H. S. Valeyev** 49

A Study of the Arc-Quenching Capability of a Mixture of SF_6 With Nitrogen and Helium for Self-Blasting HV Switchgear — **A. M. Bronstein, U. J. Bikovets** . . . 52

The Interrupting Capacity of the Contact Gap in a Synchronized Explosion Type Arc-Quenching Device — **V. L. Korolkov, O. I. Fursa** 55

Some Topological Problems in Electronic Circuit Theory — **A. I. Knyaz** 57

On the Design of an Asynchronous Generator With Two Stator Windings — **V. S. Frishman, G. A. Prokhorova** . 60

REPORTS

The Stability and Response of Semi-Controlled Rectifiers Having an Integral Type Control System — **A. G. Pridatkov, A. S. Iskhakov** 63

How the Shape of the Electrodes Influences Disruption of Stability of the Water Surface in an Electric Field — **T. K. Burayev, V. M. Slanov** 66

The Screening Effect of a System of Grounded Conductors — **E. S. Kolechitski** 69

Losses in a Cylindrical Magnetic Screen for Axial Symmetry of the Field — **L. A. Tseitlin** 71

On Regulating the Reactive Power of a Large Synchronous Motor — **O. A. Oryol** 73

CHRONICLE 74

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 621.311.018.41.016.2.78

Экспериментальная цифровая система автоматического регулирования частоты и активной мощности ЕЭС СССР. Совалов С. А., Берковичм М. А., Комаров А. Н., Вовченко И. И., Сегура Х., Попов Ю. И., Арбузов А. Ф., Анисимова Е. И. — «Электричество», 1979, № 3.

Приведены основные характеристики экспериментальной цифровой системы *АРЧМ* Единой энергетической системы СССР. Библ. 2.

УДК 63:621.311

Электрификация животноводства. Будзко И. А., Славин Р. М. — «Электричество», 1979, № 3.

Рассмотрены вопросы электрификации и автоматизации производственных процессов в животноводстве. Библ. 5.

УДК 621.311.001.57

Многофакторные модели прогнозирования развития электрических сетей энергосистем. Арзамасцев Д. А., Мардер Л. И., Морозова Н. С., Мызин А. Л. — «Электричество», 1979, № 3.

Предложены факторно-регрессионные и факторно-авторегрессионные модели прогнозирования показателей развития электрических сетей объединенных энергосистем, позволяющие прогнозировать объемы электросетевого строительства в зависимости от большого числа влияющих параметров. Показаны преимущества разработанных моделей по сравнению с существующими методами, основанными на непосредственной оптимизации конфигурации сетей и геометрическом моделировании. Библ. 6.

УДК 621.315.1

Оценка надежности работы воздушной изоляции подстанций СВН. Александров Г. Н., Герасимов Ю. А., Карраро Дж. — «Электричество», 1979, № 3.

Обобщены результаты измерений электрической прочности систем воздушных промежутков «экран — экран — земля», «провод — провод — портал», «провод — провод — земля». На основе обобщения экспериментальных данных установлены критерии подобия изоляционных систем типа «фаза — фаза — земля» и предложена методика выбора изоляционных расстояний на подстанциях СВН, в соответствии с которой выбор изоляционных расстояний производится исходя из заданного уровня надежности работы изоляции с учетом требуемого соотношения разрядов в промежутках «фаза — земля» и «фаза — фаза». Библ. 4.

УДК 621.314.223.015.38.001.24

Влияние характеристики разрядника на ограничение перенапряжений в автотрансформаторах. Джуварлы Ч. М., Бейдуллаев М. А., Муфид-заде Н. А. — «Электричество», 1979, № 3.

Рассматривается влияние вольт-секундной характеристики разрядников и их тип на перенапряжения как на входе, так и внутри автотрансформаторов, работающих в сетях с ограничением токов несимметричных коротких замыканий. Библ. 4.

УДК 621.316.1.001.2

Алгоритмы автоматизированного проектирования городских электрических сетей напряжением до 1000 В. Тарнижевский М. В., Кривцов Б. И., Городничев А. В. — «Электричество», 1979, № 3.

Предлагается аналитический способ определения расположения трансформаторных подстанций городских электрических сетей во вновь проектируемых микрорайонах. Описаны алгоритмы итеративного набора нагрузок зоны питания трансформаторной подстанции и расчета координат ее расположения.

УДК 621.332.3.064.1.001.24

Расчет токораспределения при коротких замыканиях в тяговых сетях 2×25 кВ. Марквардт К. Г., Косарев Б. И., Косолапов Г. Н., Чернов Ю. А. — «Электричество», 1979, № 3.

Аналитически получены выражения для определения токораспределения в контактной подвеске, дополнительном проводе, автотрансформаторах при коротких замыканиях в тяговых сетях переменного тока 2×25 кВ как при их одностороннем, так и при двухстороннем питании. Библ. 9.

УДК 62-83:621.85.001.5

Исследование и оптимизация взаимосвязанных систем электропривода испытательных стендов механических трансмиссий вертолетов. Борцов Ю. А., Иванов Г. М., Новиков В. И., Смольников А. П., Хмелев В. В. — «Электричество», 1979, № 3.

Исследованы электромеханические системы испытательных стендов механических трансмиссий вертолетов с взаимосвязями через упругую испытуемую трансмиссию, которая ограничивает достижение требуемых динамических характеристик процесса нагружения. Разработаны математические модели, способы настройки электротехнической коррекции рассматриваемого класса электромеханических систем с учетом влияния упругости испытуемой трансмиссии и взаимосвязей между локальными АСР скорости и момента на основании предложенного критерия оценки степени взаимосвязи. Теоретические результаты опробированы и подтверждены на опытно-промышленном объекте. Библ. 5.

УДК 62-83-52:621.3.024

Оптимальное управление динамическими процессами в электроприводах с упругими связями. Поляков Л. М., Херунцев П. Э. — «Электричество», 1979, № 3.

На основе принципа максимума Л. С. Поитрягина определены законы оптимального по быстродействию и по потерям энергии управления электроприводами постоянного тока, допускающими представление их в виде двухмассовой упруго-диссипативной системы без зазора. Показано, что оптимальные траектории содержат особые экстремали. Доказана оптимальность особых экстремалей и выполнение условий сопряжения их с неособыми. Проведено сравнение найденных законов оптимального управления с известными результатами, полученными без учета упругих связей. Библ. 12.

УДК 621.313.292.001.24

Выбор параметров управляемых бесконтактных двигателей постоянного тока с беззубцовым статором. Овчинников И. Е., Лебедев Н. И., Гращенков В. Т. — «Электричество», 1979, № 3.

Рассматриваются вопросы оптимального проектирования управляемых бесконтактных двигателей постоянного тока с беззубцовым статором. Выяснено, что для двигателей рассматриваемой конструкции существует предельное значение минимума электромеханической постоянной, практически не зависящее от мощности на валу и частоты вращения. Определен оптимальный размер немагнитного воздушного зазора, в котором расположена обмотка статора, обеспечивающий наибольшее быстродействие; показан путь определения основных параметров двигателя. Библ. 6.

УДК 621.315.62.027.3.001.4

Процессы, возникающие в высоковольтном фарфоре при длительном воздействии постоянного напряжения и температуры. Валеев Х. С. — «Электричество», 1979, № 3.

Приводятся результаты испытаний высоковольтного фарфора длительным постоянным напряжением, проводимых с целью выявления влияния материалов электродов на электропроводность и электрическую прочность изоляторов. Библ. 5.

УДК 621.316.57.064.4

Исследование дугогасящей способности смесей элегаза с азотом и гелием для автодутьевых отключающих устройств высокого напряжения. Бронштейн А. М., Быковец Ю. Я. — «Электричество», 1979, № 3.

Приводятся результаты исследования процесса горения и гашения дуги в SF_6, азоте, гелии и смесях SF_6+N_2 и SF_6+He. На реальных образцах автодутьевых отключающих устройств исследована дугогасящая способность смесей элегаза с азотом и гелием. Установлено, что добавка гелия к шестифтористой сере позволяет повысить отключаемый ток и скорость восстановления напряжения этого типа дугогасящего устройства. Библ. 5.

УДК 621.316.064.43

Отключающая способность межконтактного промежутка синхронизированного взрывного дугогасящего устройства. Корольков В. Л., Фурса О. И. — «Электричество», 1979, № 3.

Приведены результаты экспериментального исследования отключающей способности межконтактного промежутка синхронизированного взрывного дугогасящего устройства в зависимости от времени упреждения момента взрыва заряда ВВ нуля тока, величины промежутка и количества дугогасительного наполнителя. Установлено, что в интервале 2,5—10 мм наблюдается линейный рост мощности отключения от размера промежутка. Достигнуто отключение с эквивалентным током 195 кА при напряжении 19 кВ на промежутке 10 мм, оптимальном времени упреждения 300 мкс и массе заряда ВВ 1,5 г. Библ. 4.

УДК 621.38.001.1

Некоторые топологические вопросы теории электронных схем. Князь А. И. — «Электричество», 1979, № 3.

Показано, что при проведении конструкторских разработок и анализе принципиальных схем целесообразно использовать топологические матрицы типа применяемых в теории проектирования. Библ. 8.

УДК 621.313.332.001.24

О расчете асинхронного генератора с двумя статорными обмотками. Фришман В. С., Прохорова Г. А. — «Электричество», 1979, № 3.

Предложена методика расчета самовозбуждающегося асинхронного генератора с двумя статорными обмотками для автономного питания ручного электроинструмента с электроприводом повышенной частоты. Показано, что выбором оптимального насыщения достигается устойчивая работа генератора без специального компаундирующего устройства. Приведены результаты расчетов и испытаний опытных образцов. Библ. 5.

УДК 621.314.632

Устойчивость и быстродействие полууправляемых выпрямителей с системой интегрального управления. Придатков А. Г., Исхаков А. С. — «Электричество», 1979, № 3.

Рассмотрены динамические свойства различных структур интегральных систем управления полууправляемыми выпрямителями с обратной связью по выходному напряжению. В качестве метода анализа использован аппарат нелинейных разностных уравнений. Показано влияние вида структуры, числа фаз и силовой схемы выпрямителя на условие и области устойчивости замкнутой системы. Библ. 4.

УДК 621.315.615

Влияние формы электродов на условие нарушения устойчивости поверхности воды в электрическом поле. Бураев Т. К., Сланов В. М. — «Электричество», 1979, № 3.

Рассмотрено влияние формы электродов на условие нарушения устойчивости воды, дана количественная оценка граничным значениям определяющих параметров системы распылительных электродов, установлена роль коронного разряда при различных формах зарядного электрода. Библ. 13.

УДК 621.318.1.3.013

Потери в цилиндрическом магнитном экране при осевой симметрии поля. Цейтлин Л. А. — «Электричество», 1979, № 3.

Даны выражения, определяющие магнитное поле круговых контуров и катушек, заключенных в коаксиальный цилиндрический экран из материала с высокой магнитной проницаемостью. Получены формулы для потерь в экране. Библ. 5.

УДК 621.313.323.016.25-533.7

О регулировании реактивной мощности крупного синхронного двигателя. Орел О. А. — «Электричество», 1979, № 3.

Представлены соотношения для определения реактивного тока синхронного двигателя по условиям обеспечения минимума потерь электроэнергии в узле нагрузки. Полученные соотношения базируются на использовании параметров двигателей, приводимых в каталогах, и поэтому более доступны в инженерной практике. Библ. 3.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru