

Министерство высшего и среднего специального образования БССР  
Белорусский ордена Трудового Красного Знамени  
политехнический институт

# **НАУЧНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ**

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ СБОРНИК

выпуск 10

Минск, "Вышэйшая школа", 1983

УДК 620.9

НЗЧ

Главный редактор

Ю.А. Малевич, кандидат технических наук, доцент

Редакционный совет:

В.М. Бладыка, В.С. Ермаков, А.Д. Качан, А.И. Козлов, А.М. Леонков,  
Л.В. Ничипорович, В.И. Новаш, О.Н. Парфенович, Г.Е. Поспелов, В.М. Прима,  
В.С. Северянин, Б.И. Фираго, Г.Н. Хартанович, Б.В. Яковлев

Рассматриваются вопросы экономичности и надежности современного производства электрической и тепловой энергии, ее распределения и потребления. Освещается проблема автоматизации производственных технологических процессов и установок, рационального использования и внедрения современных электроприводов переменного и постоянного тока, приводятся результаты научно-исследовательской работы студентов.

Предназначен для работников научно-исследовательских, проектно-конструкторских организаций и промышленных предприятий, а также аспирантов и студентов энергетических специальностей вузов.

Н 2301000000-138 162-83  
М304 (05) - 83

А.А. ГАНЖИН, канд.техн.наук,  
Ю.А. МАЛЕВИЧ, канд.техн.наук (БПИ),  
А.Р. НИКАНОВ, канд.техн. наук (ВНИПИэнергопром)

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ БССР

Задачи развития народного хозяйства в одиннадцатой пятилетке, определенные XXVI съездом КПСС, предусматривают значительный рост показателей топливно-энергетического хозяйства. К 1985 г. намечается увеличить добычу нефти (с газовым конденсатом) в объеме 620–645 млн.т., природного газа — до 640 млрд. м<sup>3</sup> и угля — до 800 млн. т.

Производство электроэнергии увеличится за пятилетие до 1600 млрд. кВт·ч в год, в том числе на АЭС — до 225 млрд. кВт·ч. За последние годы существенно улучшилась структура топливно-энергетического баланса страны в результате увеличения в нем доли наиболее эффективных видов топлива (газ, нефть, атомная энергия), повышения степени электрификации и теплофикации.

Наша страна — единственное индустриальное государство, которое основывает свое экономическое развитие на собственных топливно-энергетических ресурсах (ТЭР), которые составляют около 2 млрд. т условного топлива (т.у.т.) ежегодно. В топливно-энергетическом комплексе (ТЭК) страны, включающем добычу топлива и других первичных ресурсов, их транспортирование, производство и передачу готовой энергии, электрификацию народного хозяйства, затрачивается до 40% всех капиталовложений, которые выделены на развитие промышленности.

Учитывая дальнейшее развитие народного хозяйства страны, когда возрастают объемы потребления топлива, энергии и резко увеличиваются затраты в ТЭК страны, требуется коренным образом улучшить работу по повышению эффективности использования энергоресурсов.

К сожалению, уровень этой работы в народном хозяйстве не в полной мере отвечает современному этапу развития экономики страны, задачам, поставленным XXVI съездом КПСС.

Здесь прежде всего следует отметить необходимость бережного использования материальных ресурсов, снижения к 1985 г. в сравнении с 1980 г. норм расхода ТЭР на 70–80 млн. т.у.т., обеспечение экономии топлива за счет использования вторичных энергетических ресурсов в количестве 80–90 млн. т.у.т. Промышленность БССР потребляет около 63 % электрической и 67 % тепловой энергии, до 75 % непосредственно сжигаемого топлива. В целом достаточно велик удельный вес использования электрической и тепловой энергии (до 70 %) от общего количества первичного топлива. В общем потреблении доля высококачественного топлива (газ, мазут) составляет 70 %.

С учетом необходимости первоочередного использования нефтепродуктов и газа в промышленности химии, нефтехимии, синтетических волокон,

удобрений и других нельзя признать удовлетворительным высокий уровень потребления газа и мазута для выработки тепловой и электрической энергии. Но если они потребляются, то необходимо принять все меры к тому, чтобы газ и мазут использовались максимально эффективно. Однако в целом к.п.д. непосредственного использования топлива в промышленности равен 15–25 %, степень использования тепла уходящих газов печей и сушильных установок еще очень низка. Также недостаточно эффективно используется газ в топках котлов районных и квартальных котельных (температура уходящих газов составляет 250–300 °С). В целом по БССР коэффициент использованного первичного (КПИ) топлива не превышает 38–40 %, что нельзя признать удовлетворительным. В промышленно развитых странах КПИ достигает 40–42 %, и считается возможным и необходимым повысить эту величину к 1990 г. до 55 %. Намечается основной путь повышения КПИ – совершенствование технологии использования энергоресурсов, а также резкое сокращение их потерь, которые составляют 25 % от всего количества ТЭР. Отечественная практика работы предприятий подтверждает тот факт, что экономическая эффективность мероприятий от снижения энергоресурсов и совершенствования энерготехнологии в 2–3 раза выше, чем затраты по добыче и транспортированию первичного топлива.

Повышение эффективности использования топлива может быть решено путем:

- повышения к.п.д. основных теплотехнических установок за счет регенерации тепла, использования тепловых ВЭР в схемах теплоснабжения;
- передачи газа таким установкам, где его использование резко повышает производительность труда и качество основной продукции (нагревательные печи, вагранки, высокотемпературные сушильные установки);
- перевода промышленных котельных, обжиговых и других подобных установок на низкосортные и местные виды топлива (мазут, уголь, торфяные брикеты и др.).

При использовании мазута в качестве топлива необходимо применять новейшие достижения в области комплексной энерготехнологии, а также прогрессивные методы сжигания, обеспечивающие не только повышение к.п.д., но и снижение в уходящих газах  $\text{CO}$ ; уменьшение поверхностей нагрева за счет повышения коэффициента теплопередачи (горение в кипящем слое, пиролиз нефтепродуктов и др.).

В связи с переводом части промышленных установок на твердые виды топлива требуется применение качественно новых методов комплексного энерготехнологического использования ТЭР с утилизацией отходов и организацией замкнутых циклов, в которых комплексно будет использоваться зола, шлаки, продукты уходящих газов и другие выбросы (например, схемы по сжиганию сланцев, углей в кипящем слое и получение углекислоты, азота). Несмотря на важность и срочность поиска решений по более эффективному методам комбинированного использования топлива в промышленности, таких исследований в БССР проводится недостаточно.

В республике непрерывно увеличивается потребление электроэнергии, что обеспечивает повышение степени механизации и автоматизации производственных процессов, резко сокращает затраты ручного труда, в целом повышает эффективность и качество работы. Характерным показателем

использования электроэнергии является коэффициент электрификации – отношение расхода электроэнергии ко всему первичному топливу. В народном хозяйстве БССР с 329 кВт·ч/т.у.т. в 1960 г. он увеличился до 895 кВт·ч/т.у.т. в 1980 г.

Если в 1970 г. на выработку электроэнергии затрачивалось 21,7 % всего топлива, то в 1980 г. – уже 29 %, а доля непосредственного использования топлива сократилась с 50,3 до 38 % и продолжает неуклонно снижаться, отражая прогрессивную тенденцию непрерывного увеличения электроооруженности труда, все большего возрастания электрифицированных процессов и средств автоматизации, вычислительной техники.

Увеличивается доля топлива, используемого для получения тепловой энергии (с 28 % в 1970 г. до 39 % в 1980 г.), что свидетельствует о все большей степени применения в ряде теплотехнических процессов пара и горячей воды вместо непосредственного сжигания топлива.

Составной и важнейшей частью надежного обеспечения растущих потребностей народного хозяйства в топливе и энергии, повышения эффективности общественного производства является вовлечение в производство вторичных энергетических ресурсов (ВЭР).

С целью получения общей характеристики состояния использования ВЭР в БССР нами проведена экспертная оценка возможного и фактического использования их в промышленности республики. Основой для этого послужили: анализ уровня потребления энергоресурсов и структуры топливно-энергетического баланса по отраслям промышленности и видам топлива; технические данные о к.п.д. технологических процессов; экспресс-информация, которая собрана службами энергонадзора областных энергосбытов о мероприятиях, проводимых на предприятиях по вовлечению ВЭР в производство. Проведенный анализ показал, что при общем годовом расходе тепловой энергии на технологические процессы производства, который составляет 30,0 млн. Гкал, считается, что возможное использование ВЭР равно 3,5 млн. Гкал, или 12 %. Фактическое использование составляет 1,0 млн. Гкал, или около 30 % от возможного.

При общем годовом расходе печного топлива на технологические процессы производства порядка 6,0 млн. т.у.т. возможное использование ВЭР оценивается, как 900 тыс. т.у.т., или 15 %. Фактическое использование составляет 420 тыс. т.у.т., или около 47 % от возможного.

В целом по республике в переводе на условное топливо возможная экономия составляет 1,5 млн. т.у.т. Фактическое использование в 1980 г. было равно 600 тыс. т.у.т., или 40 % от возможного. Как видно из приведенных показателей, в БССР еще имеются значительные резервы использования ВЭР.

На основе оперативной информации, полученной от наиболее энергоемких промышленных предприятий республики, можно констатировать, что в настоящее время здесь более конкретно приступили к анализу объектов выхода ВЭР, разработке организационно-технических мероприятий по использованию ВЭР в XI пятилетке. Уже достигнуты определенные результаты по их внедрению. Так, в 1981 г. дополнительно к используемым ВЭР вовлечено в оборот примерно 75 тыс. т.у.т., что на 12 % выше, чем было использовано в 1980 г. Значительно выросло количество предприятий, где вопросу использования ВЭР придается большое значение.

Белорусскому отделению ВНИПИЭнергопром совместно с научными организациями республики поручено разработать методические указания по оценке возможного использования ВЭР и их экономической эффективности. Это сложно, так как трудно учесть все особенности отраслевой промышленности. В настоящее время уже разработаны первые редакции методических положений по автомобильной (Авторемпроект) и химической промышленности (НИИТЭХИМ и УФНИИПИН). В методических положениях основной задачей является получение информации по состоянию выхода ВЭР, возможного и фактического их использования по процессам, агрегатам, и предприятию в целом. Должны быть учтены все виды ВЭР: тепло дымовых газов печного оборудования, вагранок, продуктовых потоков, в частности технологических растворов и нагретых материалов, тепло горячей воды от охлаждения технологического оборудования, отработанного пара, выбрасываемой паровоздушной смеси, горючие выбросы и др.

В настоящее время имеется достаточно разработанных схем и технологических решений по использованию ВЭР. Необходимо решить ряд организационных вопросов, в основном связанных с получением и изготовлением утилизационных установок, с решением вопросов стимулирования (премирования) за использование ВЭР. Действующие формы стимулирования не способствуют эффективному использованию ВЭР; персоналу предприятий проще (и выгоднее) просить и получать энергоресурсы со стороны, чем наладить эксплуатацию установок ВЭР. Практика работы передовых предприятий БССР — МАЗ, МТЗ, минских завода шестерен, завода холодильников и ряда других убедительно показывает, что решение вопросов эффективного использования ВЭР возможно при комплексном подходе к их оценке и использованию. Так, например, на Минском заводе шестерен отработанный пар молотов используется в схеме теплоснабжения завода, часть передается соседнему предприятию — Минскому электротехническому заводу, а его избытки направляются с обратной сетевой водой в сети энергосистемы (МТЭЦ-3).

В БССР имеется много примеров творческого подхода к этим вопросам. Так, Белэнергоремналадка осуществляет систематический комплексный контроль за проектами крупных ТЭЦ и котельных на всех стадиях — от проектного задания, рабочих чертежей, монтажа, наладки и до опытной эксплуатации оборудования здесь своевременно вносятся ряд новшеств, устраняются недоработки и слабости проектных решений. В промышленной энергетике наладочные организации (Белремналадка и др.) вносят поправки уже в ходе эксплуатации, когда трудно что-либо реконструировать. Своевременный комплексный подход к проектированию — увязка решений разных отделов, рациональное использование ВЭР одних систем для сокращения потребностей в других, надзор со стороны спецналадочных организаций, энергонadzора БССР за проектом до его передачи заказчику, несомненно, повысили бы эффективность использования ТЭР, существенно сократили бы сложные и трудные задачи модернизации и реконструкции систем энергоснабжения уже в процессе эксплуатации. Практика показывает, что трудно менять сложившуюся структуру и схему энергоснабжения на предприятиях. Поэтому все последующее использование ВЭР осуществляется путем применения малоэффективных мелких установок, а внедрение же крупных проектов затягивается на длительный период. В БССР накоплен значительный опыт ком-

плексного подхода к вопросам использования ВЭР на всех уровнях. Опыт разработок, проводимых в БПИ, показал, что необходимо рассматривать совместно системы и источники ВЭР: снабжение сжатым воздухом; обратное водоснабжение и охлаждение; пароснабжение, газоснабжение.

Наиболее эффективно использовать ВЭР системы газоснабжения (отходящие газы печей, сушилок и др.) в системе приточной вентиляции (подогрев воздуха), ВЭР системы пароснабжения — в системе горячего водоснабжения и отопления; ВЭР системы обратного водоснабжения — в системе горячего водоснабжения (бытовые нужды).

Так как системы приточной вентиляции и горячего водоснабжения потребляют 50—70 % всех ТЭР в виде горячей сетевой воды, то они являются и основным возможным потребителем тепла установок ВЭР всех других более высокопотенциальных систем. За счет ВЭР систем газоснабжения, пароснабжения, сжатого воздуха и обратного охлаждения можно обеспечить практически на 100 % систему бытового, технологического и горячего водоснабжения и на 50 % систему приточной (тепловой) вентиляции. В целом использование ВЭР отдельных систем составляет: 0,015—0,02 Гкал/1000 м<sup>3</sup> вырабатываемого воздуха (сжатого); 1,5—2,0 Гкал/1000 м<sup>3</sup> сжигаемого газа; 0,02—0,1 Гкал/Гкал используемого пара. Экономия энергоресурсов всех систем за счет использования ВЭР реально может составить 15—25 %.

На ряде предприятий имеются избытки ВЭР, которые из-за несовпадения режимов, разбросанности агрегатов и других факторов нецелесообразно на данном этапе (5—10 лет) использовать непосредственно в системе теплоснабжения цеха (предприятия). Их необходимо передавать в систему теплоснабжения соседних предприятий, в том числе и с обратной сетевой водой ТЭЦ и котельных.

Промышленность БССР обеспечена теплом от ТЭЦ и крупных котельных. В этих условиях предприятиям не всегда выгодно использовать низкопотенциальные ВЭР (трудности с утилизационным оборудованием, окупаемость затрат которых составляет 5—8 лет). Специалистами БПИ и Белорусского филиала энергетического института им. Г.М. Кржижановского предложена схема теплофикационного использования низкопотенциальных тепловых ВЭР предприятий путем сбора ВЭР сетевой водой ТЭЦ, котельных и передачи избытков тепла в сети энергосистемы. Это позволит значительно повысить эффективность систем теплоснабжения, использовать существующие сети и системы теплофикации для сбора и утилизации ВЭР, которые не могут быть использованы на предприятиях в ближайшие годы. Учитывая, что низкопотенциальные ВЭР составляют до 60 % всех возможных, а их использование обеспечивает значительную экономию топлива, необходимо создать условия для опытной проверки и широкого внедрения в производство предлагаемой схемы комплексного теплофикационного использования низкопотенциальных ВЭР на предприятиях БССР.

Необходимо рассмотреть возможность организовать (по опыту Болгарии, ГДР) единые центры по комплексному надзору за тепловым ВЭР на всех уровнях (проекты, наладка, эксплуатация).

Вопросы организации использования ВЭР требуют срочных решений, основанных на комплексном, системном подходе к их оценке, планированию, стимулированию во всех звеньях — от производства до эксплуатации.

УДК 621.315.1

В.Н. АЛЕКСАНДРОВ, инженер,  
Е.П. ЗАБЕЛЛО, канд. техн. наук (БелЭНИН)

## ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Широкое применение вычислительной техники при организации обслуживания электрических сетей позволяет решать ряд задач, решение которых ранее было затруднительно из-за больших объемов вычислений. По этой же причине оказывались неиспользованными, например, ряд методик оценки надежности электрических сетей. Если детально учитывать технические причины повреждаемости элементов сетей и при этом проводить более глубокое дробление линии на элементы, то обоснованно можно выбирать наиболее слабые узлы сетей и намечать мероприятия по увеличению их надежности.

Различный срок службы элементов одной и той же воздушной линии (ВЛ) и различные условия ее эксплуатации приводят к дифференцированному подходу при определении надежности этих линий. А так как эта оценка проводится для достаточно коротких промежутков времени до наступления износовых отказов, то вероятность любого состояния элемента ВЛ в будущем не зависит от состояния его в настоящее время и от того, каким образом элемент пришел в это состояние, т.е. в данном случае применима теория марковских процессов [1] при незначительных допущениях.

1. Интенсивности потоков отказов ( $\lambda$ ) и восстановлений ( $\mu$ ) считаются постоянными в рамках рассматриваемого периода времени и изменяются только при переводе к новому интервалу времени с целью учета сезона и старения объекта;

2. Отказы элементов ВЛ (отдельных блоков) являются событиями независимыми и несвязанными;

3. Вероятность нахождения  $i$ -го элемента в отключенном состоянии определяется только интенсивностями потоков отказов и восстановлений, что вполне адекватно рассматриваемому промежутку времени.

4. Режим отключенного состояния линии по причине планового ремонта не рассматривается, т.е. считаем, что  $j$ -я совокупность однородных элементов может находиться в одном из двух состояний:

а) нормальная работа ( $N$ ); б) отказ по причине потери электрической или механической прочности.

Рассмотрим объекты следующих видов: а) одноцепные ВЛ без троса; б) то же с тросом; в) двухцепные ВЛ с двумя тросами.

Граф состояний для первого случая представлен на рис. 1, а и имеет следующие состояния: 1, 2, 3, ..., 13 — состояния отказа изоляции, провода, комбинации состояний отказов по причине электрических повреждений проводов фаз  $A, B, C$  ( $A \bar{B} C, \bar{A} B C, \dots, A \bar{B} \bar{C}$ ) ..., отказ опор.

Тогда система дифференциальных уравнений Колмогорова для системы с таким графом переходов будет иметь вид:



$$\left. \begin{aligned}
 P'_N &= -P_N \sum_{s=1}^L \lambda_s + P_1 \mu_1 + \dots + P_L \mu_L ; \\
 P'_1 &= P_N \lambda_1 - P_1 \mu_1 ; \\
 &\dots \\
 &\dots \\
 P'_L &= P_N \lambda_L - P_L \mu_L
 \end{aligned} \right\} (1)$$

и заключительное уравнение

$$\sum_{s=1}^L P_s + P_N = 1,$$

где  $\lambda_s, \mu_s$  — интенсивности отказов и аварийных ремонтов соответственно;  
 $P_N$  — вероятность нахождения ВЛ во включенном состоянии;  $P_1, P_2, \dots, P_L$  —

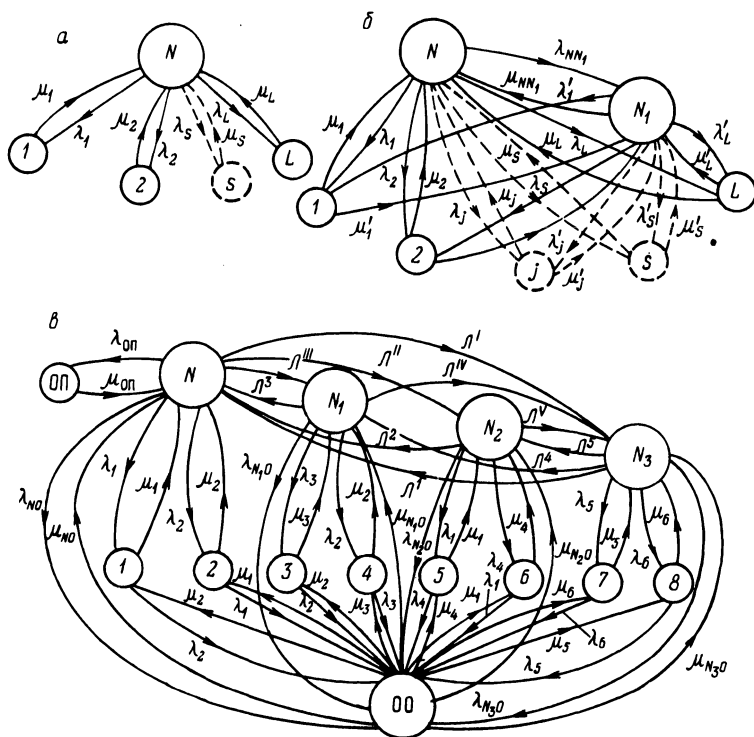


Рис. 1. Граф состояний одноцепной ВЛ без троса (а) ; с тросом (б) ; с двумя тросами (в) .

вероятности переходов в одно из состояний;  $L$  – количество состояний отказа;  $M = L + 1$  – полное количество состояний.

Получить общее аналитическое решение системы дифференциальных уравнений (1) для  $M$  состояний сложно. Поэтому решим систему при  $\mu_s = 0$ ,  $s = \bar{1}, L$  и при начальных условиях  $P_N(0) = 1$ ,  $P_s(0) = 0$ . В этом случае вероятность нахождения ВЛ во включенном состоянии в любой момент времени  $t$  периода  $\Delta t$  будет равна

$$P_N = \exp(-\lambda_1 - \lambda_2 - \dots - \lambda_L) t, \quad (2)$$

а в  $i$ -ом состоянии

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_L} [1 - \exp(-\sum_{s=1}^L \lambda_s) t].$$

Воздушная линия представляет собой систему последовательно соединенных элементов в смысле надежности и, согласно [2], отказы такой системы образуют пуассоновский поток, равный сумме потоков отказов входящих в группу элементов. Следовательно,

$$\lambda_i = \sum_{l=1}^n \sum_{\nu=1}^{x_l} \lambda_{l\nu i},$$

где  $x_l$  – объем группы однородных элементов с одинаковым износом;  $n$  – количество этих групп.

Рассмотрим пример.

Найдем вероятность отключения ВЛ 35 кВ на деревянных опорах по причине отказа хотя бы одной опоры в зимний период, если ВЛ содержит 300 опор, и на основе обработки информации о дефектах установлено, что 250 опор ( $\lambda_K = 0,00025$ ) имеют поток  $\lambda_{\Sigma K} = 0,0625$ ; 30 опор ( $\lambda_K = 0,00035$ ) –  $\lambda_{\Sigma K} = 0,0105$ ; 20 опор ( $\lambda_K = 0,00045$ ) –  $\lambda_{\Sigma K} = 0,009$ ,  $\lambda_{\Sigma i} = 0,082$ , что составляет 45% от общего потока отказов  $\lambda_3 = 0,182$  в зимний период. Согласно (2), при  $t = 1$

$$P_{0n} = 0,45 [1 - \exp^{-0,182}] = 0,0765.$$

Граф переходов восстанавливаемой системы для одноцепной ВЛ с тросом показан на рис. 1,б. Состояние  $N_1$  – состояние отказа троса.

Система дифференциальных уравнений для этого случая будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} P_N' &= -P_N \left( \sum_{s=1}^L \lambda_s + \lambda_{NN_1} \right) + \sum_{s=1}^L P_s \mu_s + P_{N_1} \mu_{NN_1}; \\ P_{N_1}' &= P_N \lambda_{NN_1} - P_N \left( \sum_{s=1}^L \lambda_s' + \mu_{NN_1} \right) + \sum_{s=1}^L P_s \mu_s; \\ P_1' &= P_N \lambda_1 + P_{N_1} \lambda_1' - P_1 (\mu_1 + \mu_1'); \\ &\dots \end{aligned} \right\}$$

$$P_L^i = P_N \lambda_L + P_{N_1} \lambda_L' - P_L (\mu_L + \mu_L').$$

где  $\lambda_{NN_1}$  — интенсивность отказов троса. (Обозначения состояний соответствуют предыдущему случаю).

Учет сезонности оценки может существенно упростить вид графа (рис. 1, б), так как зимой, например,  $\lambda_{NN_1} \approx 0$ .

Детальный учет состояний отказа для двухцепной линии с двумя тросами приводит к резкому усложнению графа состояний (рис. 1, в). На графе ОП — состояние отказа опоры; 1, 3, 5, 7 — состояние отказа правой цепи: без учета влияния повреждения тросов, отказа троса (левого троса), правого троса, обоих тросов; 2, 4, 6, 8 — то же при отказе левой цепи; ОО — состояние отказа ВЛ (без учета состояния отказа опор);  $N_1, N_2, N_3$  — состояния отказа троса (левого), правого, обоих.

Составляем систему дифференциальных уравнений для общего случая:

$$\left. \begin{aligned} P_N^i &= -P_N (\lambda_{оп} + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{N_1 O} + \lambda_{NO} + \Lambda^i + \Lambda'' + \Lambda''') + \\ &+ P_{оп} \mu_{оп} + \sum_{j=1}^3 P_{N_j} \Lambda^j + \sum_{j=1}^2 P_j \mu_j + P_{OO} \mu_{NO}; \\ P_{N_1}^i &= P_N \Lambda''' - P_{N_1} (\Lambda^3 + \Lambda^{IV} + \lambda_3 + \lambda_2 + \lambda_{N_1 O}) + P_{N_3} \Lambda^4 + \\ &+ P_3 \mu_3 + P_4 \mu_2 + P_{OO} \mu_{N_1 O}; \\ P_{N_2}^i &= P_N \Lambda'' - P_{N_2} (\Lambda^2 + \Lambda^V + \lambda_{N_2 O} + \lambda_1 + \lambda_4) + P_{N_3} \Lambda^5 + P_5 \mu_1 + \\ &+ P_6 \mu_4 + P_{OO} \mu_{N_2 O}; \\ P_{N_3}^i &= P_N \Lambda^i + P_{N_1} \Lambda^{IV} + P_{N_2} \Lambda^V - P_{N_3} (\Lambda^5 + \Lambda^1 + \Lambda^4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \\ &+ \lambda_{N_3 O}) + P_7 \mu_5 + P_8 \mu_6 + P_{OO} \mu_{N_3 O}; \\ P_1^i &= P_N \lambda_1 - P_1 (\mu_1 + \lambda_2) + P_{OO} \mu_5; \\ &\dots \\ &\dots \\ P_8^i &= P_{N_3} \lambda_6 - P_8 (\mu_6 + \lambda_5) + P_{OO} \mu_5; \\ P_{оп}^i &= P_N \lambda_{оп} - P_{оп} \mu_{оп}; \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned}
 P_{OO}^I &= P_N \lambda_{NO} + P_{N_1} \lambda_{N_1O} + P_{N_2} \lambda_{N_2O} + P_{N_3} \lambda_{N_3O} + \lambda_2 P_1 + \lambda_1 P_2 + \\
 &+ \lambda_3 P_4 + \lambda_4 P_5 + \lambda_1 P_6 + \lambda_6 P_7 + \lambda_5 P_8 - P_{OO} (2 \mu_2 + 2 \mu_1 + \\
 &+ \sum_{i=3}^6 \mu_i + \mu'_{NO} + \sum_{j=1}^3 \mu_{N_jO}) .
 \end{aligned} \right\}$$

Решение систем дифференциальных уравнений для рассмотренных случаев осуществляется с помощью стандартных программ.

Разработанная в БелЭНИИ система сбора и обработки информации о дефектах позволяет на основе формализованного документа "Ведомость дефектов" накапливать сведения о техническом состоянии, получать показатели надежности ЛЭП.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель Е.С. Исследование операций. — М.: Советское радио, 1972. — 552 с.
2. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. — М.: Наука, 1965. — 524 с.

УДК 621.316

М.А. КОРОТКЕВИЧ, канд. техн. наук,  
САНТЬЯГО ЛАХЕС ЧОЙ, инженер (БПИ)

#### К ОЦЕНКЕ УДЕЛЬНОЙ СТОИМОСТИ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Принципиально важное значение при проектировании и эксплуатации электрических систем и сетей имеет правильно установленная величина удельной стоимости потерь электроэнергии. В последние годы этому вопросу было уделено достаточно большое внимание. Однако представляет интерес определение стоимости 1 кВт·ч потерянной электроэнергии для энергосистемы, работающей в условиях тропического климата со специфическим графиком нагрузки.

Электроэнергия, теряемая в отдельных элементах электрической системы, должна быть выработана на электростанциях и передана к месту потерь. Поэтому при оценке потерь необходимо учитывать затраты на производство и передачу потерь электроэнергии.

Ранее стоимость потерь электроэнергии определяли по тарифу на электроэнергию; по топливной части станционной составляющей; по себестоимости производства электроэнергии.

Недостатки этих методов общеизвестны.

В настоящее время [1] стоимость 1 кВт·ч потерянной электроэнергии оценивается исходя из следующих положений:

— при рассмотрении схемы электроснабжения (т.е. электрической системы в целом) затраты на покрытие потерь энергии в системе следует оценивать так же, как и на полезно используемую энергию;

— когда электрическая сеть или электропередача рассматривается отдельно и определяются ее оптимальные параметры, тогда стоимость потерь электроэнергии определяется по замыкающим затратам, т.е. по стоимости производства электроэнергии на самой новой конденсационной электростанции.

При первом из указанных подходов исчисление затрат на электроэнергию следует производить с учетом расходов на передачу ее по сетям и дифференциально с учетом неравномерности графика нагрузки потребителя ( $T_{\max}$ ) и степени участия его в максимуме нагрузки системы ( $\kappa_{\max}$ ) [2].

Вначале определили стоимость 1 кВт·ч потерянной электроэнергии по формуле [2, 3]

$$\beta = C_e + p_H \left( \frac{\kappa_M \kappa_P \kappa_{CH} a_Y}{\tau} + b_T \kappa_T \right), \quad (1)$$

где  $C_e$  — себестоимость производства электроэнергии;  $p_H$  — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;  $\kappa_M$  — коэффициент попадания нагрузки рассматриваемого дополнительного потребителя (или дополнительной потери мощности) в максимум энергосистемы;  $\kappa_P$ ,  $\kappa_{CH}$  — коэффициенты, учитывающие соответственно увеличение установленной мощности электростанции на создание необходимого резерва мощности в системе и обеспечение собственных нужд электростанции;  $a_Y$  — удельное капитальное вложение на 1 кВт установленной мощности на электростанциях;  $\tau$  — время потерь;  $\kappa_T$  — удельная стоимость условного топлива;  $b_T$  — удельный расход условного топлива на электростанциях на выработку 1 кВт·ч электроэнергии.

Себестоимость производства 1 кВт·ч электроэнергии находится так:

$$C_e = b_T \kappa_T + \frac{a_Y \kappa_M \kappa_P \kappa_{CH}}{\tau} (p_a + p_{T,P}), \quad (2)$$

где  $p_a$ ,  $p_{T,P}$  — соответственно доля отчислений от капиталовложений в электростанции на амортизацию, текущий ремонт и обслуживание.

С учетом (2) выражение (1) можно записать

$$\beta = (p_a + p_{T,P} + p_H) \frac{\kappa_M \kappa_P \kappa_{CH} a_Y}{\tau} + b_T \kappa_T (p_H + 1) = V \kappa_T + \frac{A}{\tau}, \quad (3)$$

где  $A = (p_a + p_{T,P} + p_H) \kappa_M \kappa_P \kappa_{CH} a_Y$ ;

$$V = b_T (p_H + 1).$$

На рис. 1 показаны области изменения значений ( $\beta$ ), определенных для конкретной энергосистемы, которая работает в условиях тропического климата, при изменении параметров  $A$  и  $\tau$  (кривые 1 и 2).

Расчетным коэффициентам, указанным в формулах (1)–(3), придавались следующие значения:

$$p_a = 0,024-0,057; p_{T,P} = 0,004-0,02; \kappa_M = 0,8-1,0;$$

$$\kappa_p = 1,0-1,2; \kappa_{CH} = 1,0-1,2; a_y = 130-200 \text{ руб/кВт};$$

$$b_T = 283 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}; \kappa_T = 2,36 \cdot 10^{-4} \text{ руб/ч}; p_H = 0,12.$$

При этом в качестве топлива принята нефть, которая приобретает на мировом рынке по существующим ценам. Нижним значениям коэффициентов соответствует кривая 1, а верхним — кривая 2 (рис. 1).

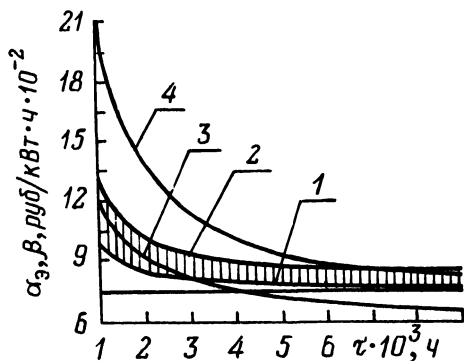


Рис. 1. Области изменения удельной стоимости потерь электроэнергии, полученные по формуле (3) (кривые 1, 2) и по формуле (7) (кривые 3, 4).

соответственно на базисной и пиковой электростанциях, определенные для их оптимального числа часов использования  $T_6, T_n$ ;  $b_6, b_n$  — удельные веса мощности соответственно базисных и пиковых электростанций, участвующих в покрытии дополнительной нагрузки, определяемые из соотношений:

$$b_6 = \frac{\frac{\tau}{\kappa_M} - T_n \kappa_{рп}}{T_6 \kappa_{рб} - T_n \kappa_{рп}}; \quad (5)$$

$$b_n = 1 - b_6, \quad (6)$$

где  $\kappa_{рб}, \kappa_{рп}$  — коэффициенты, учитывающие резервы мощности на базисных и пиковых электростанциях.

С учетом (5) и (6) выражение (4) можно преобразовать

$$a_3 = \frac{z_6 T_6 - z_n T_n}{T_6 \kappa_{рб} - T_n \kappa_{рп}} + \frac{\kappa_M}{\tau} \left( z_n T_n + \frac{T_n z_n \kappa_{рп} - T_n T_6 z_6 \kappa_{рп}}{T_6 \kappa_{рб} - T_n \kappa_{рп}} \right); \quad (7)$$

$$a_3 = B_1 + \frac{A_1}{\tau},$$

Замыкающие оценки стоимости электроэнергии ( $a_3$ ) являются дифференциальными показателями, характеризующими удельный прирост дополнительного потребления электроэнергии, и определяются по формуле [1]

$$a_3 = -\frac{\kappa_M}{\tau} (z_6 b_6 T_6 + z_n b_n T_n),$$

где  $\kappa_M$  — коэффициент попадания нагрузки рассматриваемого дополнительного потребителя (или дополнительной мощности) в максимум энергосистемы;  $\tau$  — продолжительность использования максимума нагрузки потребителя (потерь мощности);  $z_6, z_n$  — приведенные затраты на 1 кВт·ч, отпущен-

$$\text{где } A_1 = K_M \left( z_{\text{п}} T_{\text{п}} + \frac{T_{\text{п}}^2 z_{\text{п}} K_{\text{рп}} - T_{\text{п}} T_{\text{б}} z_{\text{б}} K_{\text{рп}}}{T_{\text{б}} K_{\text{рб}} - T_{\text{п}} K_{\text{рп}}}; \right);$$

$$B_1 = \frac{z_{\text{б}} T_{\text{б}} - z_{\text{п}} T_{\text{п}}}{T_{\text{б}} K_{\text{рб}} - T_{\text{п}} K_{\text{рп}}}.$$

Величины  $z_{\text{б}}$  и  $z_{\text{п}}$  определены как

$$z_{\text{б}} = \left( b_{\text{тб}} z_{\text{тб}} + K_{\text{сн.б}} \frac{a_{\text{уб}} (P_{\text{н}} + p_{\text{эс.б}})}{T_{\text{уст.б}}} \right) K_{\text{пот}} + \frac{a_{\text{с}} (p_{\text{н}} + p_{\text{с}})}{T_{\text{уст.б}}};$$

$$z_{\text{п}} = \left( b_{\text{тп}} z_{\text{тп}} + K_{\text{сн.п}} \frac{a_{\text{уп}} (p_{\text{н}} + p_{\text{эс.п}})}{T_{\text{уст.п}}} \right) K_{\text{пот}} + \frac{a_{\text{с}} (p_{\text{н}} + p_{\text{с}})}{T_{\text{уст.п}}},$$

где  $b_{\text{тб}}$ ,  $b_{\text{тп}}$  — удельный расход условного топлива на 1 кВт·ч, отпущенный шин базисной и пиковой электростанций;  $z_{\text{тб}}$ ,  $z_{\text{тп}}$  — замыкающая оценка на топливо в энергосистеме для базисных и пиковых электростанций;  $K_{\text{сн.б}}$ ;  $K_{\text{сн.п}}$ ;  $K_{\text{пот}}$  — коэффициенты, учитывающие расход на собственные нужды и потери в сетях;  $a_{\text{уб}}$ ,  $a_{\text{уп}}$  — удельные капитальные вложения на 1 кВт установленной мощности в базисную и пиковую электростанции;  $a_{\text{с}}$  — удельные капитальные вложения в электрические сети для выдачи мощности электростанции на шины распределительного напряжения подстанций энергосистем;  $P_{\text{эс.б}}$ ;  $P_{\text{эс.п}}$ ;  $p_{\text{с}}$  — соответственно доля отчислений от капиталовложений на амортизацию, текущий ремонт и обслуживание электростанций и сети;  $T_{\text{уст.б}}$ ;  $T_{\text{уст.п}}$  — число часов использования установленной мощности базисной и пиковой электростанций.

На рис. 1 показана область изменения значений ( $a_{\text{з}}$ ), определенная по формуле (7) для рассматриваемой энергосистемы при изменении параметров ( $A_1$ ) и ( $\tau$ ).

Нижним значениям коэффициентов соответствует кривая 3, а верхним — кривая 4.

Следует заметить, что параметр  $B_1$  при изменении влияющих факторов изменяется весьма незначительно.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по проектированию электроэнергетических систем/Под ред. С.С. Рокотюна и М.М. Шапиро. — М.: Энергия, 1977. — 288 с. 2. Поспелов Г.Е., Федин В.Т. Проектирование электрических сетей и систем. — Минск: Вышэйшая школа, 1978. — 302 с. 3. Поспелов Г.Е., Сыч Н.М. Учет и оценка потерь мощности и энергии в электрических сетях энергосистем. — Минск: БПИ, 1976. — 78 с.

В.И. НОВАШ, докт. техн. наук,  
Н.Н. БОБКО, ассистент,  
М.В. НЕГНЕВИЦКИЙ, аспирант (БПИ)

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРО-ЭВМ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ СЕЛЬСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6—20 кВ

В условиях широкой электрификации сельского хозяйства к надежности распределительным сетям предъявляются весьма высокие требования. Это связано с появлением крупных животноводческих комплексов, птицефабрик и других потребителей электроэнергии I категории.

Одной из главных задач на данном этапе является задача комплексной автоматизации сельских электрических сетей и в первую очередь сетей напряжением 6—20 кВ [1].

Современные распределительные сети 6—20 кВ характеризуются значительной протяженностью, наличием большого количества ответвлений (отпаек) от магистральной линии. Для повышения надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей применяется автоматическое секционирование и сетевой автоматический ввод резерва (АВР).

Автоматизация сельских электрических сетей имеет ряд специфических особенностей, связанных с большой протяженностью и разветвленностью сетей, частыми режимными изменениями топологии сетей, повышением категории надежности сельскохозяйственных потребителей.

Существующие устройства РЗА распределительных сетей, построенные на традиционной элементной базе, не отвечают современным требованиям по чувствительности, быстрдействию, селективности, надежности, унификации оборудования, возможности автоматической перестройки по режиму работы сети. Указанные недостатки могут быть преодолены при применении управляющих вычислительных машин.

Бурное развитие электроники и вычислительной техники привело к созданию и массовому производству дешевых и высокопроизводительных микро-ЭВМ.

Микро-ЭВМ представляют собой вычислительную машину, построенную на больших и сверхбольших интегральных схемах полупроводниковой микроэлектроники. В микро-ЭВМ можно выделить следующие основные элементы: микропроцессор, полупроводниковое запоминающее устройство (оперативное — ОЗУ и постоянное — ПЗУ) и средства связи с периферийными объектами [2].

Микро-ЭВМ отличаются универсальностью применения, могут выполнять функции того или иного устройства в зависимости от программы, записанной в памяти.

Следует отметить возможность стыковки микро-ЭВМ с перепрограммируемым запоминающим устройством (ППЗУ), которое позволяет хранить информацию при потере питания. ППЗУ позволяет в период опытной эксплуатации микромашинного комплекса вносить необходимые изменения в программу, производить оптимальный выбор установок защит.



Ввод входной информации в микро-ЭВМ, как правило, предусматривается двух типов — аналоговая и дискретная. Аналоговая информация характеризуется величины токов, напряжений, активной и реактивной мощности. Для восприятия ЭВМ аналоговых сигналов дополнительно используется аналого-цифровой преобразователь.

Ввод дискретных сигналов о срабатывании выявительных органов, а также о положении блок-контактов коммутационных аппаратов осуществляется непосредственно через цифровые входы устройства ввода–вывода микро-ЭВМ.

Благодаря относительно высокой надежности, малым размерам и сравнительно низкой стоимости стало вполне реальным использование микро-ЭВМ непосредственно на понижающей подстанции. Микромашинный вычислительный комплекс способен решать ряд задач оперативно-диспетчерского управления, защиты и автоматики фидеров, подстанции, отображения и обработки информации.

Рассмотрим возможные области применения микро-ЭВМ в распределительных сетях сельскохозяйственного назначения.

1. Подстанционная автоматика — защита шин и трансформаторов, избирательное отключение одного из поврежденных присоединений при двойных замыканиях на землю, управление подстанционной конденсаторной батареей, автоматическое секционирование шин, АВР, регулирование напряжения, включение трансформаторов на параллельную работу, информационная система оперативно-диспетчерского управления.

2. Автоматика присоединений — защита фидеров 6–10 кВ, АПВ выключателей, автоматическое обнаружение поврежденного участка сети и определение расстояния до места повреждения, отображение и обработка информации.

3. Сетевая автоматика — защита и АПВ секционирующих аппаратов распределительной сети, сетевой АВР.

Представляется, что на первых этапах внедрения наиболее вероятно использование автономных микро-ЭВМ для выполнения ограниченного числа функций, например, для защиты и автоматики одного–двух присоединений 6–10 кВ. Такая микро-ЭВМ может выполнять функции защиты от коротких замыканий, АПВ выключателя, контроль состояния сети, питаемой от данного присоединения. Большие вычислительные возможности микро-ЭВМ позволяют без дополнительных затрат осуществить более чувствительные защиты, основанные на сочетании токового и дистанционного принципов, при необходимости с зависимыми выдержками времени, с улучшенной селективностью при двойных замыканиях на землю. Развита логика микро-ЭВМ позволяет без дополнительной аппаратуры осуществить надежно работающие АПВ с расширенными возможностями и функциями — ускорение в зависимости от вида и места к.з., ускорение при ошибочных отключениях, различная кратность АПВ с высокими выдержками времени для второго и третьего включения и т.п. Определение расстояния до места к.з. и выявление поврежденного участка [3] может осуществляться по алгоритмам без существенных ограничений с учетом вида к.з., в том числе и при двойных замыканиях на землю.

По мере накопления опыта будет осуществляться переход к многомашинным комплексам с применением иерархических структур. При этом функции автоматики отдельных присоединений, а также управляющие функции подстанционной автоматики будут обеспечиваться отдельными управляющими комплексами нижнего иерархического уровня на базе одной или нескольких микро-ЭВМ. Связь между отдельными комплексами и их контроль осуществляет центральная ЭВМ верхнего уровня, находящаяся на диспетчерском пункте системной подстанции.

При проектировании управляющего вычислительного комплекса на подстанции представляется целесообразным сгруппировать входную информацию по времени реагирования комплекса и выработки управляющих и информационных сигналов. Для этого разобьем весь поток дискретной и аналоговой информации на три группы [4].

1. Скоростной информационный канал, образованный при помощи высокопроизводительных микро-ЭВМ. Здесь обрабатываются мгновенные величины токов и напряжений и хранятся в памяти ЭВМ.

2. Промежуточный канал, в котором хранится дискретная информация о срабатывании выключателей и положении коммуникационной аппаратуры. Этот канал не предъявляет высоких требований к скорости обработки поступающей информации.

3. Низкоскоростной информационный канал служит для обработки и хранения действующих значений токов и напряжений.

Эти каналы могут быть образованы с помощью одной или нескольких высокопроизводительных микро-ЭВМ.

При необходимости микро-ЭВМ нижнего иерархического уровня, осуществляющие непосредственные функции управления, производят обращение к тому или иному информационному каналу.

За счет группирования входной информации повышается производительность и надежность управляющего вычислительного комплекса в целом, устраняется необходимость дублирования входной информации, без которого была бы невозможна работа традиционных устройств релейной защиты и автоматики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Будзко И.А., Зиль Н.М. Комплексная автоматизация сельских электрических сетей. — Электричество, 1981, № 8, с. 1—6.
2. Хилбурн Дж., Джулич П. Микро-ЭВМ и микропроцессоры: Технические средства, программное обеспечение, применение (пер. с англ.) / Под ред. С.Д. Пашкеева. — М.: Мир, 1979. — 463 с.
3. Негинцев и ц к й М.В. Анализ изменения состояния распределительной сети по параметрам аварийного режима с использованием ЭВМ. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1982, № 8, с. 97—100.
4. Тапак К., Капоу К., Харумото Ю., Мори Т., Сузуки К., Года Т. Application of microprocessors to the control and protection system at substation. — IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol, PAS-99. No. 1 Jan./Feb, 1980, p. 344—351.

## ЛИНЕЙНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УТЯЖЕЛЕНИЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Одно из условий надежного снабжения потребителей электроэнергией высокого качества — обеспечение статической устойчивости режима электроэнергетических систем, которые в настоящее время представляют собой сложные системы кибернетического типа, включающие множество элементов, оснащенных аппаратурой для автоматического управления. Исследование статической устойчивости в таких системах практически невозможно производить без использования эквивалентирования.

Предлагается [1] разделение сложной электроэнергетической системы на эквивалентные подсистемы по условию инвариантности показателя статической устойчивости и приводится методика построения таких подсистем.

В проектной и эксплуатационной практике интерес представляет не столько оценка условий устойчивости отдельного исследуемого режима электроэнергетической системы, сколько нахождения удаленности этого режима от предельного, т.е. определение запаса статической устойчивости. Для расчета предельных по устойчивости режимов применяется метод последовательного изменения (утяжеления) исследуемого режима с проверкой на каждом шаге критериев устойчивости. Траектория утяжеления определяется совокупностью изменяемых режимных параметров и характером их изменения, например, увеличение нагрузки и генерации в заданных узлах системы, перераспределение мощности между генераторными узлами, снижение частоты [2].

В данной статье рассматривается построение линейной математической модели утяжеления режима эквивалентной подсистемы и ее использование для нахождения предельных по статической устойчивости режимных параметров [1].

Из литературы [3,4] известны различные способы безитерационного расчета утяжеленных режимов. Данный подход основан на использовании частотно-фазового метода.

Для установившегося режима гармонических колебаний с частотой  $\gamma$  уравнение эквивалентной подсистемы представится в виде

$$\underline{W}_p(j\gamma) \underline{U}_p = \underline{I}_B, \quad (1)$$

где  $\underline{W}_p(j\gamma)$  — матрица эквивалентной подсистемы, по которой устанавливается ее математическая модель;  $\underline{U}_p$  — вектор эквивалентной подсистемы, определяющий изменение режимных параметров эквивалентной подсистемы при малых возмущениях;  $\underline{I}_B$  — вектор возмущений, координаты которого определяются отклонениями прямой и обратной последовательности по задающим токам.

Вектор эквивалентной подсистемы имеет координаты по отклонениям прямой и обратной последовательности напряжения узлов эквивалентной

подсистемы  $\Delta \dot{U}_{A_1(i)}$ ,  $\Delta \dot{U}_{A_2(i)}$  (для базисного узла  $a$  [5] — координаты по отклонениям его напряжения  $\Delta \dot{U}_{A_1(a)}$  и частоты  $\Delta \dot{\omega}$ ), а также координаты по параметрам системы автоматического регулирования частоты и активной мощности (АРЧМ). Построение матрицы эквивалентной подсистемы соответствует координатам этого вектора [1,5].

Линейная математическая модель утяжеления режима эквивалентной подсистемы  $W_p(j0)$  формируется по математической модели эквивалентной подсистемы для исследования аперiodической устойчивости (режим с частотой гармонических колебаний  $\gamma = 0$ ) с добавлением эквивалента, отражающего вышестоящие по иерархии расчета подсистемы (рис. 1).

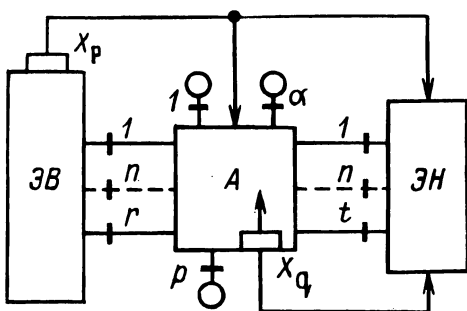


Рис. 1. Схема построения линейной математической модели утяжеления режима эквивалентной подсистемы: 1, ..., a, ..., p — шины примыкания генераторных и нагрузочных узлов собственно подсистемы А; r, t — число узлов примыкания эквивалентов, отражающих соответственно вышестоящие (ЭВМ) и нижестоящие (ЭН) по иерархии расчета подсистемы;  $X_p, X_q$  — векторы внешнего и внутреннего регулирования по контуру регулирования.

В частотно-фазовой методике используется функциональное представление элементов электро-энергетической системы их амплитудно-фазовыми частотными характеристиками, устанавливаемыми по векторным отклонениям режимных параметров. В связи с этим эквиваленты преобразуемых участков системы моделируются результирующими амплитудно-фазовыми частотными характеристиками относительно узлов примыкания. Установлена методика, позволяющая определить данные результирующие частотные характеристики по информации об установленном режиме гармонических колебаний преобразуемой части электроэнергетической системы с учетом изменения и регулирования частоты.

В записи через блоки линейную математическую модель утяжеления режима эквивалентной подсистемы можно представить матрицей

$$W_p(j0) = \left( \begin{array}{c|c} \overbrace{\frac{W_c(j0)}{W_{pc}(j0)}}^{2(p+r+t)} & \overbrace{\frac{W_{cp}(j0)}{W_{pp}(j0)}}^s \\ \hline & \end{array} \right) \cdot 2(p+r+t) \cdot s$$

где  $p$  — число учитываемых генераторных и нагрузочных узлов собственно в подсистеме А;  $(r + t)$  — число узлов примыкания эквивалентов;  $s$  — количество координат регулирования системы АРЧМ.

Изменение параметров режима на шинах узлов эквивалентной подсистемы при малых возмущениях определяется координатами вектора  $U_p$ . В связи с этим в работе для моделирования заданной траектории утяжеления

используется фиксация ряда координат вектора  $\underline{U}_p$ . При утяжелении режима все узлы эквивалентной подсистемы разделяются на узлы с возмущениями и узлы без возмущений. Соответственно координаты вектора  $\underline{U}_p$  образуют два подвектора:  $\underline{U}_{p1}$  (основные координаты) и  $\underline{U}_{p2}$  (дополнительные координаты)

$$\underline{U}_p = \begin{pmatrix} \underline{U}_{p1} \\ \underline{U}_{p2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

В случае перераспределения активной нагрузки между "передающим" узлом  $i$  и "балансирующим" узлом  $j$  имеем

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{A_1}(i) &= \Delta \hat{U}_{A_2}(i) = jU_i e^{j\beta_i} \Delta \beta_i; \\ \Delta \dot{U}_{A_1}(j) &= \Delta \dot{U}_{A_2}(j) = 0, \end{aligned} \right\}$$

где  $\Delta \beta_i$  – малое приращение фазы вектора  $\dot{U}_i$ .

Для узлов, в которых снижается напряжение, запишем

$$\Delta \dot{U}_{A_1}(i) = \Delta \hat{U}_{A_2}(i) = e^{j\beta_i} \Delta U_i,$$

где  $\Delta U_i$  – малое изменение модуля вектора  $\dot{U}_i$ .

Для узлов, в которых снижается напряжение и изменяется активная нагрузка, можно записать

$$\Delta \dot{U}_{A_1}(i) = \Delta \hat{U}_{A_2}(i) = e^{j\beta_i} [ -\Delta U_i + j(+\Delta \beta_i) ].$$

Утяжеление режима эквивалентной подсистемы по частоте можно моделировать заданием координаты

$$\Delta \dot{\omega} = a_\omega (a_\omega \ll 0).$$

Аналогичным образом (по изменению величины, фазы и частоты напряжений на шинах узлов эквивалентной подсистемы) возможно моделировать и другие траектории утяжеления режима.

По составляющим вектора (2) уравнение (1) переписывается в виде

$$\left. \begin{aligned} \underline{W}_{p11}(j0) \underline{U}_{p1} + \underline{W}_{p12}(j0) \underline{U}_{p2} &= \underline{I}_{B1}; \\ \underline{W}_{p21}(j0) \underline{U}_{p1} + \underline{W}_{p22}(j0) \underline{U}_{p2} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\underline{I}_{B1}$  – подвектор вектора  $\underline{I}_B$ , соответствующий узлам с возмущениями.

По решению системы линейных уравнений (3) возможно получить значения дополнительных координат  $\underline{U}_{p2}$  по заданным значениям  $\underline{U}_{p1}$ . В результате на каждом шаге утяжеления режима определяется новый вектор  $\underline{U}_p$ , что позволяет рассчитать комплексные значения напряжений в узлах и частоту, а по ним и другие режимные параметры эквивалентной подсистемы.

Отклонения напряжения и частоты на шаге утяжеления режима

$$\Delta \dot{U}_i = 2 \Delta \dot{U}_{A_1}(i), \quad \Delta \omega = 2 \operatorname{Re}(\Delta \dot{\omega}), \quad i = 1, \dots, p+r+t,$$

и их значения после шага утяжеления равен

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{i0} + \Delta \dot{U}_i;$$

$$\omega = \omega_0 + \Delta \omega,$$

где  $\dot{U}_{i0}$ ,  $\omega_0$  — значения напряжения и частоты до шага утяжеления режима эквивалентной подсистемы.

Матрица узловых токов

$$\underline{I} = \underline{Y}\underline{U},$$

где

$$\underline{I} = (\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_{p+r+t})^T$$

$$\underline{U} = (\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dots, \dot{U}_{p+r+t})^T,$$

$Y$  — матрица узловых собственных и взаимных проводимостей.

Мощности узлов эквивалентной подсистемы после шага утяжеления равны

$$\dot{S}_i = P_i + jQ_i = \dot{U}_i \hat{I}_i, \quad i = 1, \dots, p + r + t.$$

Располагая информацией о режимных параметрах после шага утяжеления, возможно произвести оценку условий статической устойчивости нового установившегося режима эквивалентной подсистемы [1]. После выполнения ряда утяжелений по заданной траектории выявляется предельный по устойчивости режим работы эквивалентной подсистемы.

Для повышения скорости и точности определения параметров предельных режимов возможно комбинировать использование линейной математической модели утяжеления с традиционными расчетами установившегося режима, в частности, путем перехода на линейную модель при приближении к пределу, учитывая ухудшенную сходимостью итерационных методов в этой области.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лебянкин Д.П., Ратманов С.М. Разделение сложной электроэнергетической системы на эквивалентные подсистемы для исследования статической устойчивости. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1980, № 11, с. 8—13. 2. Портной М.Г., Рабинович Р.С. Управление энергосистемами для обеспечения устойчивости. — М.: Энергия, 1978. — 352 с. 3. Андреев В.А., Марченко Е.А. Математический алгоритм расчета надежности работы энергообъединения по условиям устойчивости при аварийных небалансах мощности. — В сб.: Передача энергии постоянным и переменным током. Труды НИИПТ. Л.: Энергия, 1977, вып. 24—25, с. 11—19. 4. Кошечев Л.А., Садовский Ю.Д. Алгоритм дозировки управляющих воздействий противоаварийной автоматики сложных энергосистем. — Электрические станции, 1981, № 9, с. 53—58. 5. Лебянкин Д.П., Ратманов С.М. Уточнение методики построения показателя аperiodической устойчивости электрической системы. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1981, № 11, с. 6—11.

В.Т. ФЕДИН, канд.техн.наук,  
Ю.В. БЕЛЯНЧЕВ, канд.техн.наук,  
И.А. СТУПАК, ст. препод. (БПИ)

## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НЕКОТОРЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Сверхпроводящая линия электропередачи представляет собой совокупность сверхпроводящего кабеля с соединительными и концевыми устройствами, в котором изолированные токоведущие элементы в нормальном рабочем режиме находятся в состоянии сверхпроводимости, и устройств обеспечения заданного температурного режима (рефрижераторных и вакуумных установок, аккумуляторов холода и др.).

Надежность работы сверхпроводящей линии зависит от вероятности отказов отдельных ее элементов (токоведущих частей, электроизоляции, рефрижераторов основного и промежуточного хладагентов, теплоизоляции и др.). Общее число отказов сверхпроводящей линии можно представить в виде

$$\lambda = \lambda_T + \lambda_{ЭИ} + \lambda_M,$$

где  $\lambda_T$ ,  $\lambda_{ЭИ}$ ,  $\lambda_M$  — соответственно число отказов, вызванное переходом сверхпроводника в нормальное состояние, повреждением электроизоляции и механическими повреждениями.

Один из путей снижения числа отказов  $\lambda_T$  при заданной пропускной способности линии заключается в увеличении коэффициента запаса по току

$$k_I = \frac{I_K}{I_{раб}},$$

где  $I_K$ ,  $I_{раб}$  — соответственно критический и максимальный рабочий ток линии.

Аналогично число отказов, вызванное повреждением электроизоляции, может быть уменьшено путем увеличения коэффициента запаса по напряжению

$$k_U = \frac{E_{пр}}{E_{макс.раб}},$$

где  $E_{макс.раб}$ ,  $E_{пр}$  — соответственно наибольшая напряженность электрического поля на поверхности проводника сверхпроводящей линии в рабочем режиме и электрическая прочность применяемой электроизоляции.

Однако увеличение коэффициентов  $k_I$  и  $k_U$ , с учетом которых выполняется проектирование кабеля, приводит к удорожанию линии. Связи между  $k_I$  и  $\lambda_T$ ,  $k_U$  и  $\lambda_{ЭИ}$  требуют детального изучения. В первом приближении эти зависимости можно представить в виде

$$\lambda_T = A e^{-ak_I};$$

$$\lambda_{ЭИ} = Ve^{-bk_u}$$

где  $A, B, a, b$  – коэффициенты;  $k_1 > 1$ ;  $k_u > 1$ .

При проектировании сверхпроводящей линии важно правильно выбрать значения коэффициентов запаса по току и напряжению, удовлетворяющие приемлемому общему технико-экономическому решению с точки зрения числа отказов и стоимости линии.

Нами было изучено влияние величин коэффициентов запаса по току и напряжению на приведенные затраты в сверхпроводящую линию. Исследования осуществлялись для сверхпроводящих линий различной расчетной мощности с мягкими и жесткими сверхпроводниками. В качестве мягких сверхпроводников рассматривался ниобий, а в варианте сверхпроводящей линии с жесткими сверхпроводниками применялся станид ниобия. Результаты исследований, выполненных с применением специально составленных программ на ЭЦВМ, для линий напряжением 110 кВ приведены на рис. 1, а, б. Здесь:  $Z_{уд}^*$  – удельные приведенные затраты, приходящиеся на единицу расчетной мощности линии и 1 км линии; кривые характеризуют зависимости для сверхпроводящих линий различной расчетной мощности  $P$ .

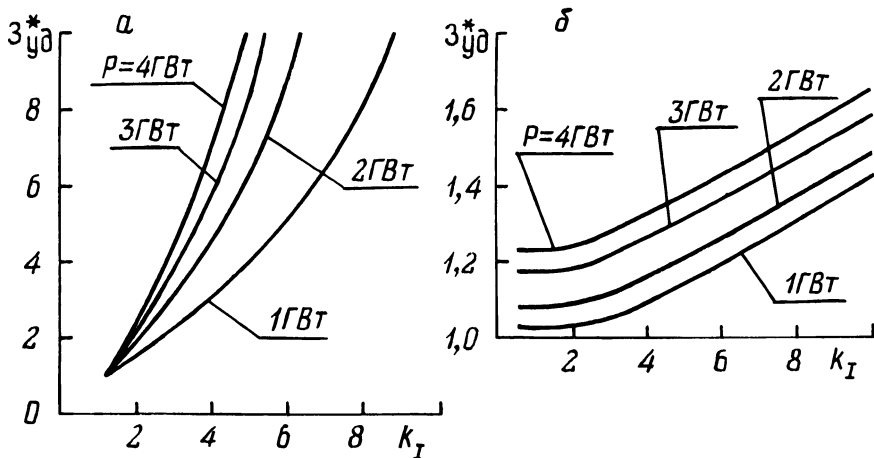


Рис. 1. Зависимость приведенных затрат от коэффициента запаса по току  $k_I$  при использовании мягких сверхпроводников (а) и при жестких сверхпроводниках (б).

Алгоритмы, по которым составлены программы на ЭЦВМ, позволяют производить оптимизацию конструктивных параметров сверхпроводящей линии. Поэтому при каком-либо изменении исходного параметра (коэффициентов  $k_I, k_u$ , расчетной мощности  $P$ , типа сверхпроводника) сначала выбирались оптимальные геометрические размеры кабеля и другие параметры линии, а затем определялись приведенные затраты.

Установлено, что в случае использования мягких сверхпроводников увеличение коэффициента запаса по току  $k_I$  приводит к существенному повыше-



нию приведенных затрат (рис. 1, а). Это объясняется тем, что при использовании мягких сверхпроводников рабочий ток линии существует только в поверхностном слое. В этих условиях по экономическим соображениям диаметры фазных коаксиальных токопроводов целесообразно принимать пропорциональными коэффициенту запаса по току. Поэтому увеличение этого коэффициента приводит к значительному увеличению диаметра фазы и, как следствие, к значительному увеличению стоимости всей линии.

В кабелях с жесткими сверхпроводниками в рабочем режиме сверхпроводник находится в смешанном состоянии. В этом случае, как показали наши исследования, увеличение запаса по току при оптимальных конструктивных параметрах линии целесообразно производить в основном за счет увеличения толщины сверхпроводящего слоя при незначительном увеличении диаметра фазы. Поэтому влияние коэффициента запаса по току на приведенные затраты менее значительно (рис.1,б). При изменении коэффициента  $K_I$  в пределах 1,2–3,0 значения приведенных затрат изменяются очень мало.

При увеличении коэффициента запаса по напряжению приведенные затраты в сверхпроводящую линию повышаются также за счет увеличения общего диаметра кабеля (рис. 2). Установлено, что тип сверхпроводника незначительно влияет на приведенные результаты исследований.

Произведенная количественная оценка влияния коэффициентов запаса по току и напряжению на приведенные затраты в сверхпроводящую линию позволяет учитывать экономические закономерности при обосновании нормируемых проектных показателей надежности сверхпроводящих линий.

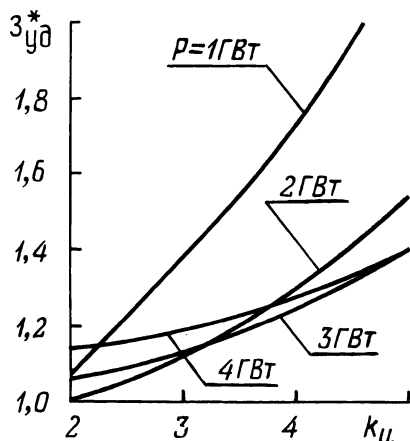


Рис. 2. Зависимость приведенных затрат от коэффициента запаса по напряжению  $K_u$ .

УДК 621.316:621.371.003.1

Л.И. ДЕМИДЕНКО, инженер (БПИ),  
Л.П. НАЗАРЕНКО, канд.техн.наук (МРТИ),  
В.В. ЯЦКЕВИЧ, канд.техн.наук (ВЗЭС)

### ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСТРОЙСТВ АНТЕННОГО ОТБОРА МОЩНОСТИ

В устройствах трехфазного антенного отбора мощности [1] верхнее плечо делителя напряжения представляет собой распределенную емкость, образуемую между фазными проводами высоковольтной линии электропередачи и антеннами. Капиталовложения, связанные с устройством антенны, опре-

деляются затратами на провода и изоляторы и могут быть найдены из выражения

$$\kappa_{\text{д}} = (\xi_{\text{пр}} a_{\text{пр}} + 3 a_{\text{пл}} \xi_{\text{пл}} h_{\text{из}} n) i_{\text{а}},$$

где  $\xi_{\text{пр}}$ ,  $\xi_{\text{пл}}$  — удельный вес проводов и стеклопластиковых изоляторов;  $a_{\text{пр}}$ ,  $a_{\text{пл}}$  — удельные затраты проводов и стеклопластиков;  $n$  — количество изоляторов;  $h_{\text{из}}$  — длина изолирующего стержня.

Нижнее плечо делителя устройства ПДНА состоит из статических конденсаторов. Тогда стоимость капиталовложений в этот элемент устройства будет определяться из выражения

$$\kappa_{\text{д2}} = a_{\text{с}} \sqrt{\kappa_{\text{д}} - 1} \left( 1 + \frac{2\sqrt{\kappa_{\text{д}} - 1}}{\kappa_{\text{д}}} \right) S_{\text{о}}.$$

Непосредственные капиталовложения для устройства ПДНА могут быть определены по формуле [3]

$$\kappa_{\text{н}} = \kappa_{\text{д}} + \kappa_{\text{д2}} + \kappa_{\text{к}} + \kappa_{\text{тр}} - \nu \kappa' + \kappa_{\text{Q}},$$

где  $\kappa_{\text{д1}} + \kappa_{\text{д2}}$  — капиталовложения в делитель напряжения,  $\kappa_{\text{к}}$  — в комплектующее устройство,  $\kappa_{\text{тр}}$  — в понижающий трансформатор соответственно;  $\kappa'$  — капиталовложения в элементы схемы отбора, одновременно используемые для других нужд линии электропередачи;  $\nu$  — коэффициент, учитывающий степень комбинированного использования оборудования;  $\kappa_{\text{Q}}$  — капиталовложения в реактивную мощность, генерируемую в линию устройством отбора мощности.

Большая часть капиталовложений (80–85 %) падает на делитель напряжения и компенсирующее устройство [2].

Для определения оптимальных областей применения устройств отбора мощности в качестве экономического критерия использованы удельные приведенные затраты, определяемые выражением

$$z = \frac{3}{S_{\text{о}}}.$$

Для определения расчетной стоимости можно воспользоваться удельными затратами

$$C_{\text{п}} = \frac{3}{\cos \varphi T_{\text{м}}} . \quad (1)$$

Выражение (4) можно привести к развернутому виду:

$$z = \frac{\rho (\delta S_{\text{о}} + \kappa_{\text{тр}} - \nu \kappa') + \beta \tau \Delta \rho}{S_{\text{о}}}, \quad (2)$$

где  $\delta = \sqrt{\kappa_{\text{д}} - 1} a_{\text{LC}} \pm a_{\text{Q}} (\sqrt{\kappa_{\text{д}} - 1} + \sin \varphi)$ .

Здесь  $a_{\text{LC}}$  — удельные затраты на реакторы и конденсаторы;  $a_{\text{Q}}$  — удельные

затраты на компенсацию потерь реактивной мощности;  $p = p_a + p_H + p_{o.p}$ .  
 Здесь  $p_a, p_{o.p}$  — доли отчисления на амортизацию, обслуживание и ремонт;  
 $p_H$  — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений.

Для устройств трехфазного антенного отбора мощности

$$\delta_{\text{ПДНА}} = (\xi_{\text{пр}} a_{\text{пр}} + 3 \xi_{\text{пл}} a_{\text{пл}} h_{\text{из}} n) (\sqrt{3} U_{\text{АХ}} U_{\text{тр}} \sqrt{\kappa_{\text{д}} - 1} \times \\ \omega C_{\text{руд}})^{-1} + a_{\text{с}} \sqrt{\kappa_{\text{д}} - 1} \left( 1 + \frac{2\sqrt{\kappa_{\text{д}} - 1}}{\kappa_{\text{д}}} \right),$$

где  $U_{\text{АХ}}$  — наводимые напряжения на антенных проводах;  $C_{\text{руд}}$  — удельная емкость антенных проводов.

Разделив почленно выражение (2) на  $S_0$ , получим

$$z = r\delta + \frac{p(\kappa_{\text{тр}} + \nu\kappa')}{S_0} + \frac{\beta\tau\Delta p}{S_0}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что  $r\delta$  не зависит от мощности и определяет —ся удельными стоимостями конденсаторов и реактора, коэффициентом деления  $\kappa_{\text{д}}$  и коэффициентом мощности  $\cos\varphi$ . Второй член выражения (3) изменится обратно пропорционально мощности отбора  $S_0$ .

В качестве критерия при экономическом сопоставлении различных способов отбора мощности принимались удельные приведенные затраты (1). Удельные затраты на трансформаторные подстанции находились по известным методикам [1, 4]. Непосредственные капиталовложения при трансформаторном способе отбора мощности определялись из выражения

$$\kappa_{\text{н}} = \kappa_{\text{тр1}} + \kappa_{\text{тр2}},$$

где  $\kappa_{\text{тр1}}$  — капиталовложения в трансформаторы на номинальное напряжение линии;  $\kappa_{\text{тр2}}$  — капиталовложения в понижающие трансформаторы.

Затраты на трансформаторные подстанции и номинальные напряжения 110—1150 кВ в диапазоне мощности отбора 25—2500 кВ·А определялись по формуле

$$z_{\text{ПТП}} = p \sum_{i=1}^2 \kappa_{\text{тр}i} + \beta\tau \sum_{i=1}^2 \Delta p_{\text{тр}i},$$

где  $\Delta p_{\text{тр}i}$  — потери активной мощности в трансформаторах  $i$ -й ступени трансформации.

Для нахождения областей оптимального способа электроснабжения на основании приведенных расчетов были построены зависимости удельных затрат от напряжений высоковольтных линий электропередач и отбора мощности. На рис. 1 представлена зависимость удельных затрат ПДНА:

$$z = F(U_{\text{лЭП}}, S_0).$$

Пересечения полученных плоскостей удельных затрат подстанций с реактивными делителями напряжения (ПДН) и плоскостей удельных затрат тран-

сформаторных подстанций (ПТП) позволяют определить оптимальные экономические области применения различных видов отбора мощности.

На рис. 1 заштрихованная часть плоскости  $S_0, U_{ЛЭП}$  является оптимальной областью применения ПДНА. Как видно из рис. 1, при отборе малых мощностей удельные приведенные затраты устройств ПДНА меньше трансформаторных подстанций ПТП. Тогда оптимальная область использования ПДНК определяется пределами (рис. 1): 560 кВ·А от ЛЭП – 220 кВ ( $S_{01}$ ); 1200 кВ·А от ЛЭП – 300 кВ ( $S_{02}$ ); 3000 кВ·А от ЛЭП – 500 кВ ( $S_{03}$ ). На рис. 2 представлены критериальные значения мощности отбора для различных устройств с реактивными делителями напряжения.

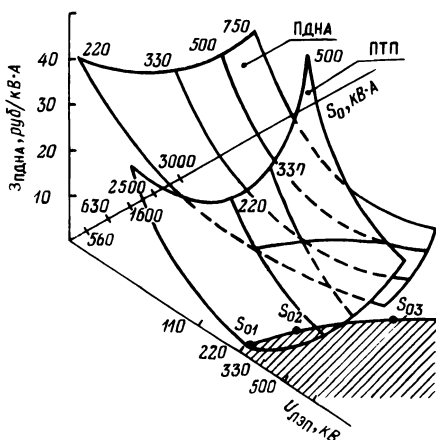


Рис. 1. Зависимость удельных затрат ПДНА:  $z_{\text{ПДНА}} = F(U_{\text{ЛЭП}}, S_0)$ .

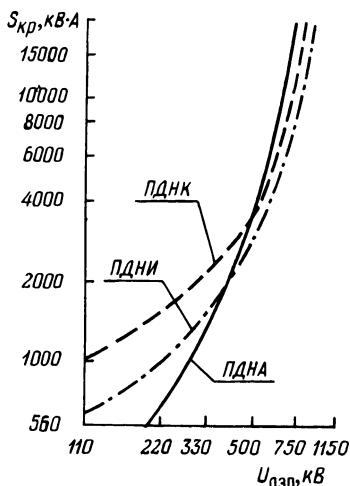


Рис. 2. Зависимости критериальных значений мощности отбора от номинального напряжения линии электропередачи.

В антенных устройствах стоимостные показатели верхних элементов делителей напряжения меньше, чем в конденсаторных устройствах. С ростом класса напряжения линии электропередачи капиталовложения на верхние элементы делителей ПДНА относительно устройств ПДНК, ПДНИ убывают, так как уменьшается протяженность самих антенн [1]. Поэтому зависимость критериальной мощности (рис. 2) у ПДНА с ростом класса напряжений линий электропередачи изменяется более интенсивно по сравнению с конденсаторными и индуктивными устройствами. Однако при отборе мощности от линий электропередачи напряжением 110–500 кВ преимущество по экономическим показателям имеют устройство ПДНК. Применение устройства ПДНА предпочтительнее при использовании сверхвысоковольтных линий электропередачи 750 кВ и выше.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Назаренко Л.П., Федорова И.А. Исследование антенного отбора мощности от линий электропередач для электрификации сельских потребителей. — В сб.:

Механизация и электрификация сельского хозяйства. Минск: Ураджай, 1976, вып. 19, с. 103—110. 2. Назаренко Л.П. Отбор мощности от высоковольтных линий для электроснабжения сельскохозяйственных потребителей. — В сб.: Механизация и электрификация сельского хозяйства. Минск: Ураджай, 1974, вып. 16, с. 102—119. 3. Юренков В.Д. Применение НДМЕ для электрификации рассредоточенных потребителей небольшой мощности. — Труды ВНИИЭ, вып. 31, 1967, с. 67—71. 4. Федорова И.А., Назаренко Л.П. Оптимальные условия отбора мощности от высоковольтных линий электропередач. — В сб.: Опыт принятия оптимальных решений при проектировании и эксплуатации электрических сетей и систем. — Минск: Вышэйшая школа, 1976, с. 10—14.

УДК 621.311.017

Л.П. ПАДАЛКО, канд.техн.наук,  
А.И. БАРАННИКОВ, инженер (БПИ)

## ТЕКУЩЕЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Планирование развития электрической сети, как известно, осуществляется в два этапа. На первом разрабатывается схема сети на некоторый перспективный период, который в зависимости от назначения сети может составлять 5—10 и более лет. Вторым этапом является текущее планирование, при котором осуществляется разработка годовых планов развития. Необходимость такого планирования обусловлена изменением исходных условий, положенных в основу при разработке перспективного плана (изменение нагрузок, появление новых потребителей и т.д.). По существу, текущее планирование представляет собой корректировку решений, полученных при разработке перспективной схемы, вследствие уточнения исходной информации. Решения, принятые при текущем планировании, подлежат реализации, так как они относятся к той категории мероприятий, задержка в осуществлении которых может привести к весьма негативным последствиям.

Разработка текущего плана осуществляется в условиях неопределенности исходной информации как на планируемый год, так и на перспективу, которую необходимо учитывать при решении динамических задач. Задача состоит в получении наиболее обоснованного решения на плановый год с учетом возможных колебаний параметров исходной информации на перспективный период. Ее решение требует определения области устойчивых решений, принимаемых на текущий год.

В статье рассматриваются особенности планирования распределительной сети напряжением 35—110 кВ. При этом предполагается, что электросетевые объекты, намеченные к сооружению, делятся на две группы. К первой относятся те, которые предназначены для присоединения новых потребителей, ко второй — направленные на повышение экономичности работы сети (разгрузочные подстанции, резервные линии и т.д.) [1]. Могут быть объекты и смешанного назначения.

Существует два возможных подхода к выбору решений в условиях неполной информации. Первый основывается на использовании методов сто-

хастического программирования. При этом предполагается известным закон распределения и его параметры для неопределенных факторов. Однако такая информация при планировании развития сетей 35–110 кВ, как правило, отсутствует.

Второй подход базируется на использовании методов теории игр [2]. В этом случае для исходных величин должен задаваться диапазон их возможных значений. Для рассматриваемой задачи — это величины удельного ущерба от недоотпуска электроэнергии и допустимые погрешности при определении потерь энергии. Для решения задач в игровой постановке применяются различные критерии, в частности минимальный критерий

$$\min \max Z_{ij}, \quad (1)$$

где  $Z_{ij}$  — приведенные затраты при  $i$ -м варианте решения и  $j$ -м состоянии внешних условий.

Использование критерия (1) в динамической постановке практически трудно осуществимо, так как при этом резко возрастает число возможных вариантов внешних условий. Поэтому представляется необходимым поиск возможности решения задачи в статической постановке. Предварительным этапом при этом является обоснование критерия оптимальности.

Как известно, выбор перспективного плана развития сетей осуществляется по условию минимума приведенных затрат с учетом факторов времени [3]. В рамках решения этой задачи определяются сроки и места сооружения электросетевых объектов, а также их параметры. Для объектов второй группы обоснованию подлежат их параметры, схемы привязки к сети и места размещения. Вопрос об экономической целесообразности сооружения таких объектов не ставится. Ввод в строй объектов второй группы должен приводить к повышению эффективности работы сети (повышению надежности, снижению потерь энергии), которая должна быть не меньше нормативной. Это обстоятельство дает возможность заменить динамическую постановку задачи на статическую, включая в годовой план только объекты, эффективность которых выше нормативной. Такой подход требует, чтобы был задан состав объектов и их параметры. Практикой текущего планирования данная постановка несколько видоизменяется. Задача сводится при этом к выбору электросетевых объектов из заданного списка при ограничении по суммарным капиталовложениям. В связи с этим возникает вопрос о согласовании хозрасчетного критерия эффективности с народнохозяйственным, ибо текущий план развития разрабатывается энергосистемой, для которой не безразлично, как изменяются экономические показатели работы при вводе новых электросетевых объектов. Для объектов первой группы хозрасчетный эффект проявляется в увеличении прибыли энергосистемы вследствие увеличения объема реализации энергии. Размер данного эффекта не может служить основанием для решения вопроса о целесообразности сооружения объекта, однако позволяет судить о направлении изменения экономичности работы энергосистем и тем самым осуществлять более обоснованный выбор параметров электросетевых объектов. Для объектов второй группы экономический эффект может быть также выражен увеличением прибыли энергосистем  $\Delta \Delta$  вследствие снижения потерь энергии  $\Delta \Delta$  и увеличения реализации

энергии  $\Delta \mathcal{E}'$  из-за сокращения аварийных перерывов электроснабжения:

$$\Delta D = \Delta \mathcal{E} \beta + \Delta \mathcal{E}' T_{\text{ср}},$$

где  $\beta$  — топливная составляющая себестоимости электроэнергии;  $T_{\text{ср}}$  — средний тариф на электроэнергию. Этот эффект не тождествен народнохозяйственному эффекту, а меньше его, так как определение величины реализации электроэнергии производится по стоимости 1 кВт·ч, значительно меньшей величины удельного ущерба. Кроме того, величина  $\beta$  существенно ниже замыкающей оценки 1 кВт·ч потерь, используемой при определении народнохозяйственной эффективности. Хозрасчетная и народнохозяйственная эффективности будут при этом согласованы, если рассчитанный показатель сравнительной эффективности  $E$  окажется выше нормативного  $E_{\text{н}}$  по вновь вводимым объектам, а хозрасчетный показатель эффективности  $E_1$  превысит действующий в энергосистеме коэффициент рентабельности:

$$E = \frac{\Delta U}{\Delta K} > E_{\text{н}} \quad \text{и} \quad E_1 = \frac{\Delta D}{\Delta K} > K_{\text{рен}},$$

где  $\Delta U$  — народнохозяйственный эффект, выраженный снижением стоимости потерь энергии и уменьшением ущерба из-за аварийного недоотпуска энергии;  $\Delta K$  — дополнительные капиталовложения.

Рассмотрев возможные подходы к формированию критерия оптимальности, перейдем теперь к выявлению конкретных путей учета факторов неопределенности при разработке текущего плана развития сети. Задачу сформулируем следующим образом. При заданном составе электросетевых объектов, намечаемых к вводу в текущем плановом году, следует разработать оптимальный план с учетом ограничений по капиталовложениям, принимая во внимание неопределенность исходной информации. В качестве показателя эффективности для рассматриваемых объектов принимаем коэффициент сравнительной эффективности капитальных вложений. При детерминированной постановке решение задачи сводится к расчету этого коэффициента для каждого объекта, ранжировки объектов в порядке снижения коэффициентов и выборе такой их совокупности, которая укладывалась бы в заданный объем капитальных вложений [1]. Неопределенность исходной информации исключает возможность однозначной оценки коэффициентов эффективности и позволяет определять лишь зоны вероятных значений этого коэффициента с учетом различных сочетаний параметров неопределенных факторов.

Используя в качестве критерия оптимальности коэффициент сравнительной эффективности, составляется платежная матрица для всех намечаемых к вводу объектов. Выбор оптимального варианта осуществляется по максимальному критерию

$$\max \min E_{ij}. \quad (2)$$

В соответствии с критерием (2) выбор минимального значения  $E_{ij}$  из каждой строки платежной матрицы производится для такого сочетания значений неопределенных факторов, которое характеризуется минимальными величинами

нами удельных ущербов и потерь энергии. Данное обстоятельство позволяет рассчитывать не всю матрицу, а только один ее столбец, что дает возможность сократить размерность динамической задачи, если для каждого года оптимизируемого периода выбрать экстремальные значения неопределенных факторов. При этом следует иметь в виду, что для критерия минимума затрат экстремальные значения соответствуют максимальным величинам неопределенных факторов. Выбор оптимального решения должен осуществляться так же, как и для детерминированной постановки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К вопросу выбора оптимального текущего плана развития электрической сети/ Л.П. П а д а л к о, А.И. Б а р а н н и к о в, Н.Н. Н и к о л ь с к а я и др. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1977, № 2, с. 121—125. 2. Л а н г е О. Оптимальные решения. — М.: Прогресс (пер. с польского), 1967. — 285 с. 3. Инструкция по определению экономической эффективности капиталовложений в развитие энергетического хозяйства (генерирование, передача и распределение электрической и тепловой энергии). — М.: Энергия, 1973. — 56 с.

УДК 621.316.99.001.24

А.Н. ШУЛЬГА, инженер (БО ЭСП)

### РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАСТЕКАНИЮ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ В НЕОДНОРОДНОЙ ЗЕМЛЕ

В качестве сосредоточенных заземлителей рассмотрим горизонтальный заземлитель, вертикальный заземлитель и прямоугольную пластину, расположенные в неоднородной слоистой земле с удельными сопротивлениями слоев  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_i, \dots, \rho_n$  и их мощностями  $h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_{n-1}$  ( $h_n = \infty$ ).

Определение сопротивления растеканию заземлителей будем выполнять по методу наведенных потенциалов [1]. При этом для упрощения последующего изложения материала предположим, что заземлители размещены в первом слое земли. Следует заметить, что рассмотрение этого частного случая не влияет на изложение сущности предлагаемого метода расчета. Кроме того, решение поставленной задачи применительно к такому расположению заземлителей имеет важное значение для практических расчетов заземляющих устройств электроустановок, так как горизонтальные заземлители (и пластины) в абсолютном большинстве случаев прокладываются в первом слое земли. Вертикальные заземлители также можно представить расположенными в первом слое земли, если учесть, что с допустимой для практических целей погрешностью пересекаемые ими слои могут быть заменены одним эквивалентным слоем с удельным сопротивлением  $\rho_{1з}$  [2].

Вывод расчетных соотношений для сопротивления растеканию заземлителей по методу наведенных потенциалов выполним на основе выражений для потенциала точечного источника тока, которое в системе координат  $x, y, z$  ( $x, y$  в плоскости поверхности земли) представляется в виде



$$U_T = U_{T0} + \frac{I_T \rho_1}{4\pi} \int_0^{\infty} W(m) I_0(mr) dm, \quad (1)$$

где  $I_T$  — ток точечного источника;  $U_{T0}$  — потенциал, наводимый точечным источником в однородном грунте;  $I_0(mr)$  — функция Бесселя первого рода нулевого порядка;

$$W(m) = \frac{1}{2} (R(m)_1 - 1) (e^{mz} + e^{-mz}) (e^{m\eta} + e^{-m\eta});$$

$R(m)_1$  — пространственная характеристика среды;  $\eta$  — глубина расположения точечного источника тока.

Ток  $I_T$  определим, предполагая, что ток заземлителя  $I_3$  равномерно распределяется по длине горизонтального и вертикального заземлителей  $l$  и площади пластины  $A \times B$  (где  $A$  и  $B$  стороны пластины). Будем иметь

$$I_T = \frac{I_3}{l}; \quad I_T = \frac{I_3}{AB}.$$

Функция  $R(m)_1$  вычисляется по рекуррентной формуле [3]

$$R(m)_i = \frac{1 + \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} R(m)_{i+1} - \left(\frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} R(m)_{i+1} - 1\right) e^{-2mh_i}}{1 + \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} R(m)_{i+1} - \left(\frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} R(m)_{i+1} - 1\right) e^{-2mh_i}};$$

$$R(m)_n = 1.$$

В соответствии с методом наведенных потенциалов, используя (1), сопротивления растеканию горизонтального заземлителя  $R_{\Gamma}$ , вертикального заземлителя  $R_B$  и пластины  $R_{\Pi}$  будут иметь следующие выражения:

$$R_{\Gamma} = R_{\Gamma 0} + \frac{\rho_1}{2\pi l^2} \int_0^{\infty} (R(m)_1 - 1) ch^2(mt) \iint_{00}^{ll} J_0(m\sqrt{(x_i - x_j)^2 + r^2}) dx_i dx_j dm; \quad (2)$$

$$R_B = R_{B0} + \frac{\rho_1}{2\pi l^2} \int_0^{\infty} (R(m)_1 - 1) J_0(mr_0) \int_t^{t+l} \int_t^{t+l} ch(mz) ch(m\eta) dz d\eta dm; \quad (3)$$

$$R_{\Pi} = R_{\Pi 0} + \frac{\rho_1}{2\pi A^2 B^2} \int_0^{\infty} (R(m)_1 - 1) \operatorname{ch}^2(mt) \int_0^A \int_0^B \int_0^A \int_0^B (m \sqrt{x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} dx_i dx_j dy_i dy_j dm, \quad (4)$$

где  $t$  — глубина заложения горизонтального заземлителя, пластины и верхнего конца вертикального заземлителя;  $r_0$  — радиус горизонтального и вертикального заземлителей;  $R_{Г0}$ ,  $R_{В0}$ ,  $R_{\Pi 0}$  — сопротивления растеканию в однородной земле с удельным сопротивлением  $\rho_1$  соответственно горизонтального, вертикального заземлителя и прямоугольной пластины.

К настоящему времени расчетные выражения в явном виде для определения сопротивления растеканию получены только для случая двухслойной земли [4]. В случае многослойной земли расчетные соотношения могут быть получены в форме многократных бесконечных рядов, однако практическая реализация таких алгоритмов невозможна из-за весьма большого объема вычислительной работы.

Для практической реализации выражений (2) — (4) в данной работе предлагается следующий подход, который основывается на двух положениях: первое — интегралы с конечными пределами вычисляются формальными методами; второе — вычисление интегралов с бесконечными пределами осуществляется численными методами.

Вычисление определенных интегралов в (3) не представляет затруднений. Для вычисления аналогичных интегралов в (2) и (4) представим функцию Бесселя в виде ряда и, разложив подынтегральную функцию по формуле бинома Ньютона, произведем интегрирование. Тогда для выражений (2) — (4) получим:

$$R_{Г} = R_{Г0} + \frac{\rho_1}{2\pi l} \int_0^{\infty} \left(R\left(\frac{m}{l}\right)_1 - 1\right) \operatorname{ch}^2\left(\frac{mt}{l}\right) G\left(m, \frac{r_0}{l}\right) dm;$$

$$R_{В} = R_{В0} + \frac{\rho}{2\pi l^2} \int_0^{\infty} (R(m)_1 - 1) J_0(mr_0) [\operatorname{sh}(m(t+l)) - \operatorname{sh}(mt)]^2 dm;$$

$$R_{\Pi} = R_{\Pi 0} + \frac{\rho_1}{2\pi A} \int_0^{\infty} \left(R\left(\frac{m}{A}\right)_1 - 1\right) \operatorname{ch}^2\left(\frac{mt}{A}\right) P\left(m, \frac{B}{A}\right) dm;$$

где

$$G\left(m, \frac{r_0}{l}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{m^{2n}}{a^{2n} n!} \sum_{k=0}^n \frac{\left(\frac{r_0}{l}\right)^{2k}}{k! (n-k)! [2(n-k)+1] (n-k+1)}$$

$$P\left(m, \frac{B}{A}\right) = \sum_{n=0}^{\infty} (1)^n \frac{m^{2n}}{2^{2n} n!} \sum_{\kappa=0}^n \frac{\left(\frac{B}{A}\right)^{2\kappa}}{\kappa! (n-\kappa)! [2n-\kappa+1] (n-\kappa+1)} \times$$

$$\frac{1}{(2\kappa+1)(\kappa+1)}; \quad (6)$$

$$\frac{B}{A} > 1.$$

Использование специальных функций  $G$  и  $P$  в расчетных алгоритмах в том виде, в каком они представлены выше, невозможно из-за большого расхода машинного времени на их вычисление.

Для реализации этих функций в программах расчета сопротивлений растеканию заземлителей предлагается использовать метод интерполяции, основанный на применении сплайн-функций. На основании результатов расчета функций  $G$  и  $P$  по формулам (5), (6) были построены кубические сплайны двух переменных в кусочно-многочленном представлении, которые затем используются в алгоритмах расчета сопротивлений растеканию рассмотренных заземлителей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Эбин Л.Е., Якобс А.И. Применение метода наведенных потенциалов при расчете сложных заземлителей в неоднородных грунтах. — Электричество, 1964, № 6, с. 1–6.
2. Якобс А.И., Мишкин В.М. Расчет сопротивления вертикальных стержневых заземлителей, работающих в многослойной земле. — Электричество, 1972, № 9, с. 89–90.
3. Филатов В.А., Филатова В.Н. Вычисление кажущегося сопротивления в методе ВЭЗ при помощи ЭВМ. — Труды Сиб. научно-исслед. ин-та геологии, геофизики и минер. сырья. Новосибирск, 1975, вып. 215, с. 113–119.
4. Якобс А.И., Коструба С.И., Живаго В.Т. Расчет заземляющих устройств с помощью ЭВМ — Электричество, 1967, № 8, с. 21–27.

УДК 621.311.153.001

В.В. ПРОКОПЧИК, канд.техн.наук (ГПИ),  
Б.И. КУДРИН, канд.техн.наук (ГИПРОМЭЗ)

### ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В связи с изменением порядка проектирования в настоящее время схемы электроснабжения предприятий разрабатываются на перспективу 5 и 10 лет. При этом данные по отдельным электроприемникам и их группам для предприятий отсутствуют. В условиях неполной информации проектировщик должен тем не менее определить основные показатели, характеризующие развитие и построение системы электроснабжения: общее электропотребление

А; получасовой максимум нагрузки  $P_M$ ; установленную мощность электроприемников  $P_Y$  по предприятию и его цехам и коэффициенты спроса  $K_C$  и др. Эти показатели определяют стоимость системы электроснабжения и должны быть согласованы с энергосистемой. Электрические нагрузки являются основой построения схемы электроснабжения и корреляционно связаны с величиной капитальных вложений и последующими издержками эксплуатации.

После внедрения "Указаний по определению электрических нагрузок в промышленных установках" [1] казалось, что вопрос расчета электрических нагрузок решен и что с погрешностью 10 % будет обеспечено соответствие между расчетами и действительными нагрузками. Однако проведенные в ряде отраслей обследования показали неудовлетворительное положение с загрузкой силовых трансформаторов, питающих и распределительных сетей и других элементов систем электроснабжения. Так, для предприятий черной металлургии загрузка силовых трансформаторов на 25–40 % меньше их номинальной мощности, что вдвое ниже директивной для отрасли в целом. При этом загрузка распределительных сетей не превышает 20–30 % [2]. Это объясняется прежде всего ошибками в расчете электрических нагрузок, составляющими 50–200 %. Это в основном следствие абсолютизации [1] метода упорядоченных диаграмм, справедливого лишь для групп электроприемников и узлов напряжением до 1000 В, а также неправильного определения значений расчетных нагрузок по средней мощности. При выполнении проектов, когда определяется схема электроснабжения предприятий, отдельных районов, производств и цехов, расчет нагрузок выполняется для различных уровней (ступеней). Выделим приемники электроэнергии, характеризующиеся номинальной (установленной)  $P_H (P_Y)$ , расчетной  $P_P$ , средней  $P_C$  мощностями, коэффициентом использования  $K_{И}$  по уровням (УР) системы электроснабжения (рис. 1):

– отдельные электроприемники, электроприемники агрегата, группы механизмов, связанных технологически или территориально, которые характеризуются  $P_P^1, P_C^1, K_{И}^1, \dots$ ;

– примем их за 1 УР;

– распределительный пункт (щит управления), образующий 2УР со своими коэффициентами  $P_P^2, \dots$ , питает несколько электроприемников (участки цеха);

– распределительные пункты питаются со щита низкого напряжения трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ; для этой ступени характерно объединение основных и вспомогательных потребителей, объединение таких электроприемников, взаимная зависимость которых с точки зрения их загрузки может быть охарактеризована низким коэффициентом корреляции – 3УР;

– шины распределительной подстанции (РП), каждая секция которой питается по отдельной линии и от которой питаются трансформаторы 10/0,4 кВ и высоковольтные электроприемники – 4УР;

– РП питаются с шин ГПП, при этом независимость максимумов нагрузки предыдущих уровней с точки зрения технологии и эксплуатационных режимов увеличивается – 5УР;

— сумма нагрузок по всем ГПП предприятия определяет получасовой максимум  $P_M$ , который заявляется энергосистеме и подлежит оплате — БУР.

Указанное число уровней крупного предприятия можно считать минимальным. Но дело не в количестве уровней, а в неприменимости одних и тех же теоретических положений для всех уровней.

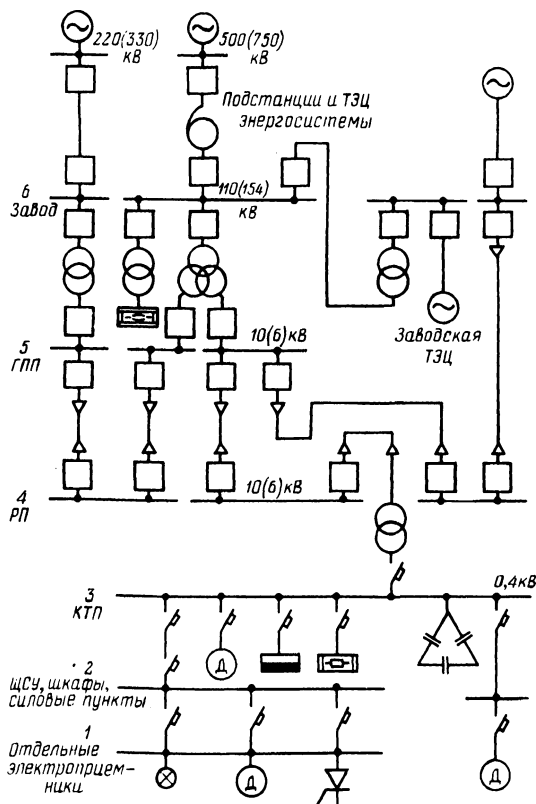


Рис. 1. Уровни (ступени) системы электроснабжения промышленного предприятия.

Покажем неприменимость действующих "Указаний" для 3–6 уровней. Одно из положений [1], заключающееся в том, что  $K_M$  быстро падает с увеличением числа электроприемников  $n$ , статистически не подтверждается. Не подтверждается и утверждение о том, что широкое внедрение поточного производства и его автоматизация, как правило, приводят к возрастанию  $K_C$ .

Во-первых, данные по 60 металлургическим предприятиям показали, что  $K_M$  по предприятию (БУР) в целом составляет 1,15–1,60. Зависимость  $K_M = f(n, K_{и})$  не значима. Коэффициент спроса со временем не растет, а падает; особенно с увеличением автоматизации и механизации. Во-вторых, разнообразие установленных электроприемников предопределяет низкую

повторяемость режимов работы, негауссово распределение коэффициентов, определяющих  $P_M$  от 3-го уровня и выше, а следовательно, неприемлемость допущений: 1) о равномерном распределении коэффициентов использования; 2) о принятии коэффициента загрузки отдельных электроприемников, равным 0,8.

Возвращаясь к исходным положениям [1], заметим, что  $P$  определяется для цикла, работающего оборудования. Уже на 4-м уровне — РП (на КТП — в меньшей степени), а затем на 5-м и 6-м уровнях начинают сказываться факторы, влияющие на нагрузки, но не имеющие прямого отношения к электро-технике: проявляются системные свойства.

Отметим некоторые из них: существующая (и неизбежная) аварийность (электрические машины — 6,7 %); плановые простои и ремонты перевалки валков и т.д. (10—30 % календарного времени); работа механизмов и агрегатов, определяемая не технологией, а временем суток (года), состоянием погоды; социальные факторы.

В изложенном заключается главное объяснение низкого коэффициента спроса по металлургическим предприятиям, несоответствия  $K_C$  по отдельным цехам: в [1] по доменному цеху  $K_C = 0,6$ , фактический по Магнитогорскому и ряду других — 0,12, по заготовочному стану 0,6—0,65 и 0,23, ремонтным цехам 0,4—0,5 и 0,12 и т.д.

Есть также практическая трудность расчета нагрузок: для расчета нагрузок надо иметь перечень электроприемников с указанием загрузки, сведений по технологическим режимам и др. Но часть электроприемников определится после построения схемы электроснабжения, выбора машзалов и др., после решений, принимаемых другими отделами, замены при поставке оборудования и др.

Другими словами, параллельность проектирования и его осуществление "сверху вниз" исключает выдачу данных прежде, чем будет решено размещение и определена мощность ГПП, РП, ТП. Основываясь на системном исследовании электрического хозяйства, можно выдвинуть более сильное утверждение: для современных комплексов металлургических цехов и агрегатов стоимостью строительно-монтажных работ 60—200 млн.руб. даже после окончания рабочих чертежей не может быть составлен перечень электроприемников, включающих хотя бы номинальные данные.

Выходом из создавшегося положения является внедрение системы показателей, включающей расчетные нагрузки, удельный расход электроэнергии и др. и охватывающей предприятие в целом, крупный комплекс, отдельный объект (цех) [3].

Выбор сечений провода к отдельному электроприемнику и группе из двух-трех приемников осуществляется по номинальной мощности. Учитывая это, а также требования по механической прочности, по унификации сечений, исходя из условий монтажа и других, можно утверждать, что для выбора большей части провода на 1УР применение "Указаний" не требуется. Их следует применять для 2УР и в отдельных случаях при выборе трансформаторов 10/0,4 кВ. Расчет электрических нагрузок для предприятия, ГПП, РП и, как правило, для ТП (выбор числа и мощности трансформаторов) следует производить, рассматривая предприятие, цех, участок как систему и ком-

плексно используя известные методы определения расчетных нагрузок: 1) по коэффициенту спроса, определяя расчетную нагрузку по установленной мощности электроприемников; 2) по средней мощности, которая определяется по отчетному расходу электроэнергии и числу часов работы выделенной подсистемы и статистически определенному коэффициенту максимума; 3) по удельным расходам электроэнергии на единицу продукции; 4) по удельным плотностям электрических нагрузок. Любой из методов может быть принят за основной, но тогда другие должны применяться для проверки. Это объясняется недостаточностью исходных данных, необходимостью сопоставления из-за противоречивости тенденций, которые следует учитывать, определяя нагрузки на перспективу (5–10) лет.

Нельзя не отметить, что расчет нагрузок в настоящее время представляет собой статическую картину и не отвечает на существенные вопросы: когда во времени ожидается нагрузка, как в зависимости от изменения технологических показателей изменится на перспективу  $P_M$ ,  $A$  и др.

Таким образом, исследования в области расчета нагрузок необходимо вести в направлении создания системы технико-экономических показателей, обязательной для проектных организаций и действующих предприятий, и затем — к информационной базе у генеральных проектировщиков, головных и специализированных институтов (и на предприятиях), на основе которой будут выполняться расчеты, анализ, прогноз и принятие решений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Указания по определению электрических нагрузок в промышленных установках. — Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок, 1968, № 6, с. 3–17. 2. К у д р и н Б.И. О комплексном методе расчета электрических нагрузок. — Изв. вузов СССР. Электромеханика, 1981, № 2, с. 209–210. 3. К у д р и н Б.И. Оценка электрического хозяйства металлургического предприятия. — Промышленная энергетика, 1978, № 7, с. 5–8.

УДК 621.37/39

А.А. ПОЛИЩУК, ассистент (БПИ)

#### О ГРУППИРОВКЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Так называемая теория идеализированного клистронного генератора допускает ряд упрощенных предположений, которые в достаточной степени не всегда соответствуют реальной конструкции. Так, предположение о том, что влиянием плотности объемного заряда на электронные процессы в клистроне можно пренебречь и, в частности, распределение потенциала между резонатором и отражателем считать линейным, является неверным, так как современные генераторные клистроны работают при значительных плотностях электронного потока. Учет объемного заряда прежде всего приводит к нелинейному распределению потенциала в области отражателя. Наибольшее влияние пространственного заряда на движение электронов сказывается в плоскости поворота электронов обратно к резонатору. Это приводит к изменению вре-

мени пролета электронов в области отражателя и, следовательно, к смещению точек поворота всех электронов, что прежде всего сказывается на процессе группировки электронного потока.

Анализ явлений в клистронном генераторе с учетом объемного заряда будем вести на основе аппроксимации истинной кривой потенциала ломаной [1].

На рис. 1 кривые 1 и 2 — распределение потенциала при отсутствии и наличии объемного заряда, линия 3 — аппроксимация кривой.

Запишем уравнение Пуассона в следующем виде:

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = \frac{2i}{A v} \quad (1)$$

Используя обозначения рис. 1, можно ввести следующие величины:

$$V = V_0 \varphi; \quad dx = \xi_1; \quad a_0 = \frac{V_0}{V_1} \quad (2)$$

С учетом (2) уравнение (1) переписывается в такой форме:

$$\frac{d^2 \varphi}{d \xi_1^2} = \frac{1}{\varphi^{1/2}} \quad (3)$$

Решение уравнения (3) имеет вид

$$\frac{d\varphi}{d \xi_1} \frac{d^2 \varphi}{d \xi_1^2} = \frac{1}{\varphi^{1/2}} \frac{d\varphi}{d \xi_1} \quad (4)$$

Или же уравнение (4) можно записать через производные от потенциала

$$(\varphi')^2 = 4 \varphi^{1/2} + 4 \beta,$$

откуда

$$\varphi' = + 2 \sqrt{\varphi^{1/2} + \beta} \quad (5)$$

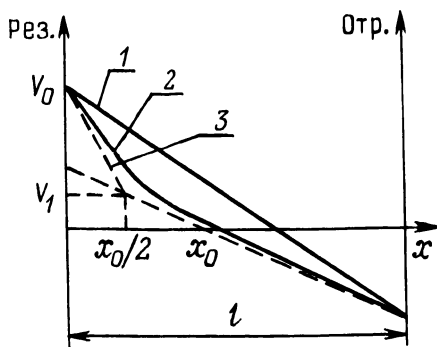


Рис. 1.

В выражении (5) следует сохранить отрицательный знак, так как, согласно рис. 1, при движении от резонатора к отражателю потенциал падает.

Разобьем пространство между резонатором и отражателем на две области, где первая область между второй сеткой и плоскостью поворота электронов имеет нелинейный градиент потенциал и зависит от плотности объемного заряда, а вторая область между плотностью поворота электронов и отра-



жателем имеет линейный градиент потенциала с изменением расстояния и зависит от величины приложенного напряжения отражателя, так как в этой плоскости нет электронов (рис. 1).

Приравнивая в точке возврата электронов потенциалы первой и второй областей, из соотношения (5) найдем производную от потенциала в виде

$$\varphi' = -2\beta^{1/2}. \quad (6)$$

На основании определения напряженности поля можно записать следующие соотношения:

$$E = -\frac{U_{\text{отр}}}{l - x_0}; \quad E = -\frac{\varphi}{\xi_d - \xi_0}. \quad (7)$$

Используя (7) и (6) и после несложных преобразований получим выражение для константы  $\beta$

$$\beta^{1/2} = \frac{1}{2} \frac{\varphi}{\xi_d - \xi_0}. \quad (8)$$

Выражение (5) после введения новой переменной  $\varphi = v^2$  переписется так:

$$\frac{2vdv}{\sqrt{\beta+v}} = -2d\xi_1. \quad (9)$$

Для удобства дальнейших вычислений соотношение (9) после преобразования запишется

$$\frac{(v+\beta-\beta)dv}{\sqrt{v+\beta}} = \sqrt{\beta+v} dv - \frac{\beta dv}{\sqrt{\beta+v}} = -d\xi_1. \quad (10)$$

После интегрирования (10) и соответствующих преобразований получим уравнение, связывающее между собой потенциал и расстояние в первой области в безразмерных величинах:

$$\eta_d = (1-2\beta)(1+\beta)^{1/2} - (v-2\beta)(v+\beta)^{1/2}, \quad (11)$$

где

$$\eta_d = \frac{3}{2} \xi_d; \quad \xi_d = \frac{3}{2} a l. \quad (12)$$

На основании (12) и (8) выражение для первеанса запишется

$$\eta_d = 10 \sqrt[3]{\frac{i}{\sqrt{3/2}} \frac{l}{d}}. \quad (13)$$

Если подставить в формулу (13) числовые значения величин, соответствующих электрическим и конструктивным параметрам реального клистрона, то значение для первеанса может достигать значительной величины, т.е. влиянием объемного заряда пренебрегать нельзя.

Для удобства графического представления параметра  $\beta$ , зависящего от пространственного заряда, окончательно уравнение (11) запишется

$$(\varphi_0^{1/2} - 2\beta) (\varphi_0^{1/2} + \beta)^{1/2} = (1 - 2\beta) (1 + \beta)^{1/2} - \eta_d, \quad (14)$$

где

$$\varphi_0 = \frac{-U_{\text{отр}}}{U_0}; \quad \beta^{1/2} = \frac{3}{4} \frac{\varphi_0}{\eta_d - \eta_0};$$

$$\eta_0 = 2\beta^{3/2} + (1 - 2\beta) (1 + \beta)^{1/2}$$

На рис. 2 графически представлено решение уравнения (14). Кривые 2 показывают, что чем больше ток, а следовательно, и плотность объемного заряда, тем меньше параметр  $\beta$ . В то же время при неизменном первеансе  $\eta_d$  увеличение относительного потенциала  $\varphi_0$  приводит к увеличению параметра  $\beta$ , т.е. к уменьшению действия объемного пространственного заряда за счет смещения точек поворота электронов в сторону резонатора. На рис. 3 приведены величины относительного времени пролета  $a$  от параметров  $\eta_d$  и  $\varphi_0$ . Значение параметра объемного заряда  $\beta$  рассчитывалось по формуле

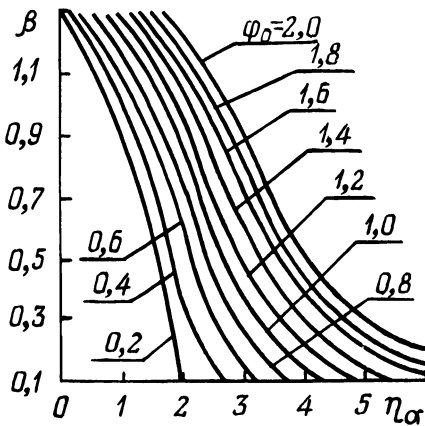


Рис. 2.

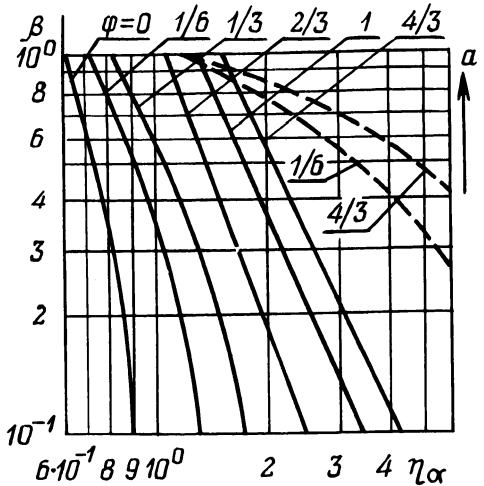


Рис. 3.

(14). Из рис. 3 видно, что с увеличением первеанса и соответственно плотности объемного заряда время пролета электронов в пространстве отражателя уменьшается. В то же время при одной и той же плотности объемного заряда дальнейшее понижение потенциала отражателя, т.е. увеличение  $\varphi_0$ , приводит к увеличению времени пролета электрона  $a$ , что объясняется прежде всего смещением точек поворота электронов в сторону резонатора и, как видно из рис. 1, уменьшением действия пространственного заряда. Однако при низких

потенциалах на отражателе и  $\eta_d > 1$  величина  $a > 1$ , что соответствует увеличению времени пребывания электронов в поле отражателя.

Так как пространственный заряд прежде всего влияет на скорость движения электронов, то эффективность группирования при нелинейном распределении потенциала можно характеризовать определенным коэффициентом  $K$ , который будет учитывать скорость электрона в точке  $V_1$  (рис. 1).

Согласно [2], коэффициент  $K$  определяется через величины, характеризующие распределение потенциала в пространстве отражателя:

$$K = \frac{1 + a - a^2}{a^2 (1 + 2a)},$$

где  $a$  находится из [1] по формуле

$$a^2 = \frac{4}{3} \beta^{1/2} \eta_0.$$

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента эффективности группирования  $K$  от параметра плотности объемного заряда  $\eta_d$ . Как следует из рис. 3, при малых плотностях объемного заряда  $\eta_d \ll 1$  и больших напряжениях на отражателе  $\varphi > \frac{2}{3}$  величина коэффициента  $K$  близка к единице и влияние объемного заряда на процесс

группировки существенного воздействия не оказывает. Однако при увеличении плотности объемного заряда  $\eta_d$  до 2-х  $K$  может достигать нескольких единиц. В то же время для одного и того же  $\eta_d$  с уменьшением  $\varphi_0$  коэффициент  $K$  увеличивается, что объясняется более глубоким проникновением электронов в тормозящее поле и, очевидно, большим воздействием на них пространственного заряда.

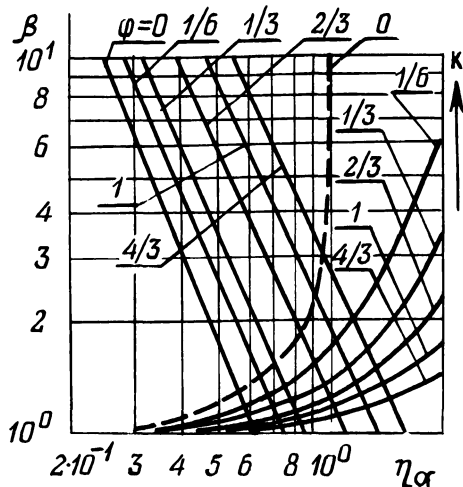


Рис. 4.

## ЛИТЕРАТУРА

1. П о л и щ у к А.А., С а в е л ь е в В.Я. Новые разработки элементов и схем радиотехнических устройств. — Минск: Вышэйшая школа, 1972, с. 31–34.
2. П о л и щ у к А.А. Влияние объемного заряда на электронные процессы при группировке электронного потока. — Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1969, XII, № 3, с. 1112–1126.

# ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

УДК 621.314.632

В.Г. ЧЕРНОМАШЕНЦЕВ, канд. техн. наук,  
В.А. ПАЦКЕВИЧ, инженер,  
С.Л. КУРИЛИН, мл. науч. сотр. (БИИЖТ)

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ ИНВЕРТОРА С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ РЕЖИМА РАБОТЫ

В качестве источников питания для индукционных электротермических установок в промышленности получили распространение схемы тиристорных преобразователей частоты, инверторная часть которых содержит обратные диоды [1]. Применение таких схем позволяет сравнительно просто решить вопрос стабилизации режима работы преобразовательного агрегата при изменении эквивалентных электрических параметров индукционного нагревателя. Одной из разновидностей инверторов с обратными диодами является последовательный мостовой инвертор с параметрической стабилизацией режима [2].

В данной статье разработана методика определения параметров основных элементов инвертора при практической реализации установки, основные положения которой базируются на анализе электромагнитных процессов [2]. При определении номинальных параметров инвертора в качестве исходных взяты результаты теплового и электрического расчетов индукционного нагревателя, которые выполняются по методикам [3]. Отмеченные расчеты позволяют для конкретного технологического процесса определить мощность и частоту источника питания, а также эквивалентные параметры нагрузочного колебательного контура. В номинальном режиме работы этот контур обладает только активной проводимостью.

Далее необходимо задаться напряжением источника питания, от которого зависит амплитуда напряжения, прикладываемого к тиристорам инвертора, и с этой точки зрения его целесообразно снижать. Однако с уменьшением напряжения источника питания приходится увеличивать токи тиристоров, что также является нежелательным из-за возрастания потерь в установке. Данный инвертор рекомендуется питать через трехфазный мостовой выпрямитель от обычной трехфазной сети 380 В без промежуточного трансформатора. При этом напряжение на входе инвертора составляет 510–520 В.

Расчет параметров коммутирующей цепи инвертора следует начинать с выбора коэффициента распределения емкостей  $K_C$ , коэффициента заполнения  $K_3$  и затухания инверторного колебательного контура  $d_0$  [2]. Последние определяются из основных расчетных характеристик. Так как расчет инвертора осуществляется путем численного решения на ЦВМ систем дифференциальных уравнений высокого порядка, то аналитические выражения, пока-

зываются влияющие коэффициенты  $k_c, k_3$  и  $d_o$  на основные характеристики инвертора, отсутствуют.

С целью простоты использования полученных результатов в практической работе на основании расчетных данных были найдены эмпирические зависимости, которые с точностью 4–5 % показывают влияние данных коэффициентов на основные характеристики инвертора с параметрической стабилизацией режима. Для относительного значения амплитуды напряжения на тиристорах инвертора эмпирическая зависимость имеет вид

$$U_{T \max}^* = \frac{2,1}{k_3^{0,11}} - \frac{d_o}{k_c^{0,45}} \quad (1)$$

Амплитудное значение тока тиристоров

$$I_{T \max}^* = \frac{2,41}{d_o \frac{0,58}{k_c^{0,33}} \left(1 + \frac{1}{k_3}\right)} \quad (2)$$

Относительное значение входного тока, равное относительному значению входной мощности,

$$I_d^* = P_d^* = (0,92 + 0,013 k_c) [(0,27 + 0,7 k_3) \sin (2,48 d_o - 1,3 k_3 d_o) + (0,069 - 0,086 d_o)] \quad (3)$$

Коэффициент использования тиристоров по мощности, определяемый в соответствии с [2], равен

$$k_{\mu} = (0,3817 + 0,0054 k_c) [(0,27 + 0,7 k_3) \sin (2,48 d_o - 1,3 k_3 d_o) + 0,069 - 0,086 d_o] d_o \frac{k_c^{0,58}}{k_c^{0,33}} \quad (4)$$

Относительное значение напряжения на нагрузке

$$U_H^* = (70,7 + k_c) (0,004 + 0,1 k_3) \sin (2,48 d_o - 1,3 k_3 d_o) \quad (5)$$

Приведенные эмпирические выражения справедливы при изменении коэффициентов в следующих пределах:  $3 < k_c < 15$ ;  $0,2 < k_3 < 0,7$ ;  $0,2 < d_o < 1,2$ .

С помощью выражений (1)–(5) можно, используя соответствующие критерии, определить оптимальные значения коэффициентов  $k_c, k_3, d_o$ . Если необходимо получить максимальный коэффициент использования тиристоров по мощности, то, согласно приведенным зависимостям, можно рекомендовать:  $d_o = 0,9$ ;  $k_3 = 0,6$ ;  $k_c = 6$ .

По выбранным коэффициентам, используя (3), определяется относительное значение входного тока. Далее по известным входному напряжению

$U_d$  и требуемой мощности  $P_d$  определяем волновое сопротивление колебательной цепи инвертора:

$$\rho_o = \frac{U_d^2 I_d^*}{P_d}. \quad (6)$$

Номинальное эквивалентное сопротивление нагрузочного колебательного контура в соответствии с [2] равно

$$R_3 = d_o \rho_o.$$

Сравнивая  $R_3$  с аналогичной величиной, определяемой в результате расчета индукционного нагревателя, можно сделать вывод о целесообразности включения между нагрузкой и инвертором согласующего устройства, которое (в простейшем случае — нагрузочный трансформатор) целесообразно включать, если расхождение между номинальным и реальным сопротивлениями будет составлять более 20–25 %.

Исходя из введенного в [2] коэффициента заполнения, получаем

$$\frac{1}{\sqrt{L_o C_o}} \sqrt{1 - 0,25 d_o^2} = \frac{\omega_H}{2k_3}, \quad (7)$$

где  $L_o$  — величина индуктивности коммутирующего дросселя;  $C_o$  — величина эквивалентной емкости коммутирующей цепи инвертора;  $\omega_H$  — круговая частота тока нагрузки.

Воспользовавшись формулой для определения относительного значения индуктивности, приведенной в [2], и используя (6) — (7), можно определить  $L_o$ :

$$L_o = \frac{k_3^2 U_d^2 I_d^* \sqrt{1 - 0,25 d_o^2}}{P_d \omega_H}.$$

Аналогично величина эквивалентной емкости колебательной цепи инвертора

$$C_o = \frac{2P_d k_3^2 \sqrt{1 - 0,25 d_o^2}}{U_d^2 I_d^* \omega_H}.$$

Величина емкости коммутирующего конденсатора

$$C_K = \frac{C_o C_p}{C_p - C_o},$$

где  $C_p = k_c C_o$ .

Следует отметить, что методика определения основных параметров коммутирующей цепи инвертора рассмотрена применительно к номинальному

режиму работы установки. Однако известно, что при нагреве ферромагнитных материалов параметры индукционного нагревателя изменяются в значительной степени [3], а следовательно, будут изменяться коэффициенты  $k_3$  и  $d_0$ . Это в свою очередь приведет к изменению токов и напряжений на тиристорах. Поэтому при выборе тиристорного инвертора для определения наиболее тяжелых условий целесообразно рассчитать индукционный нагреватель для трех режимов: холодного, промежуточного, горячего [3]. Выбор тиристорного инвертора необходимо осуществлять по худшему из них.

Экспериментальная проверка данной методики показала, что она может быть рекомендована для установок мощностью более 20 кВт, так как при меньшей мощности возрастает погрешность расчетов из-за потерь энергии в элементах схемы инвертора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тиристорные преобразователи высокой частоты /Е.И. Беркович, Г.В. Ивенский, Ю.С. Иоффе и др. — Л.: Энергия, 1973, с. 87—95. 2. Высокочастотный стабилизированный тиристорный инвертор/ В.Г. Черномащенко, В.А. Пачкевич, Ю.М. Зинин, А.М. Уржумсков. — В сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики. Минск: Высшая школа, 1979, вып. 6, с. 110—114. 3. Случоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. — Л.: Энергия, 1974, с. 47—48; 65—68; 86—90.

УДК 621.3.078.001

А.Г. КОСТЮКОВСКИЙ, инженер  
(БелЭНИИ)

### ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГЕЛИОСТАТОМ

Автоматическая система управления гелиостатом (АСУ ГС) находит широкое применение при строительстве солнечных электростанций башенного типа. Ансамбль АСУ ГС, объединенный целевой функцией по стабилизации заданного направления отраженного потока солнечной радиации при видимом перемещении Солнца по небосводу, образует концентратор солнечной энергии. В состав АСУ ГС входят следующие структурные единицы: двухкоординатный электропривод, плоский гелиостат, двухкоординатный оптический датчик, регулятор. Схема перемещения гелиостата — азимутально-зенитальная. В данной работе рассматриваются области устойчивости АСУ ГС в параметрах регулятора с использованием метода Гурвица.

Показано [1], что плоский гелиостат описывается двумя взаимосвязанными динамическими звеньями, которые (при условии  $(\frac{B_1}{a})^2 \frac{1}{mK} < 0,02$ , где  $B_1$  — демпфирование плоского отражателя, Нмс/рад;  $a = \frac{P}{2}$ , м;  $P$  — полупериметр отражателя;  $m$  — масса отражателя, кг;  $K$  — жесткость отражателя, Нм/рад) представляют собой два взаимосвязанных инерционных звена второго порядка. Поскольку постоянные времени отдельно взятого динами-

ческого звена гелиостата имеют разный порядок [1], то представляется целесообразным рассматривать канал гелиостата как инерционное звено. Учитывая незначительные скорости перемещения, упрощаем задачу до рассмотрения одного канала управления гелиостатом. Наиболее интересным представляется исследование азимутального канала, поскольку постоянная времени гелиостата в этом случае зависит от перемещения по зенитальной оси, т.е. является параметром азимутального канала управления. Передаточная функция плоского гелиостата по зенитальному каналу управления является частным случаем передаточной функции гелиостата по азимутальному каналу управления [1]. Следовательно, устойчивость азимутального канала является необходимым и достаточным условием устойчивости зенитального канала, что в целом гарантирует устойчивость АСУ ГС. В качестве второго упрощения задачи понимаем непрерывность и дифференцируемость функции выходной величины оптического датчика (оптической обратной связи). Такое упрощение справедливо, если гелиостат не располагается в особых точках поля гелиостатов – точках противотени [2], обусловленных спецификой разложения на составляющие траектории перемещения Солнца по небосводу в плоскостях азимутально-зенитального перемещения гелиостата. Это также сопряжено с рассмотрением редуктора как безлюфтового устройства и принимается нами в силу незначительной скорости и монотонности перемещения гелиостата.

При исследовании областей устойчивости АСУ ГС удобно использовать регулятор с обобщенной передаточной функцией

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{c_0 p^2 + c_1 p + c_2}{d_1 p + d_2},$$

которая включает передаточные функции наиболее распространенных типов простейших регуляторов [3]. Тогда, если в качестве задающего воздействия принять угловое перемещение Солнца в проекции на азимутальную плоскость перемещения гелиостата, а в качестве регулируемой величины – отклонение от заданного направления азимутальной проекции отраженного от гелиостата потока солнечной радиации, передаточная функция азимутального канала АСУ ГС запишется следующим образом:

$$W_{\text{сист}}(p) = \frac{l_1 k_{\text{од}} p (T_1 p + 1) (T_{\text{дв}} p + 1) \left( \frac{d_1}{d_2} p + 1 \right)}{p (T_1 p + 1) (T_{\text{дв}} p + 1) \left( \frac{d_1}{d_2} p + 1 \right) + l_1 k_{\text{од}} k_{\text{дв}} \frac{c_0}{d_2} \left( \frac{c_0}{c_2} p^2 + \frac{c_1}{c_2} p + 1 \right)},$$

где  $T_1$  – постоянная времени гелиостата по азимутальному каналу перемещения;  $T_{\text{дв}}$  – приведенная постоянная времени электродвигателя;  $l_1$  – расстояние от центра отражателя до оптического датчика, м;  $k_{\text{од}}$  – коэффициент передачи оптического датчика, В/рад·м;  $k_{\text{дв}}$  – коэффициент двигателя по скорости с учетом передаточного числа редуктора, внешнего и внутреннего скоростного трения соответственно на выходной оси гелиостата и двигателя, рад/В·с;  $c_0, c_1, c_2, d_1, d_2$  – параметры регулятора.



Характеристическое уравнение АСУ ГС по азимутальному каналу запишем в виде следующего алгебраического уравнения:

$$a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 = 0, \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{где } a_0 &= T_1 T_{\text{дв}} \frac{d_1}{d_2}; \\ a_1 &= T_1 T_{\text{дв}} + T_1 \frac{d_1}{d_2} + T_{\text{дв}} \frac{d_1}{d_2}; \\ a_2 &= T_1 + T_{\text{дв}} + \frac{d_1}{d_2} + k_0 \frac{c_0}{d_2}; \\ a_3 &= k_0 \frac{c_1}{d_2} + 1; \quad a_4 = k_0 \frac{c_2}{d_2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $k_0 = l_1 k_{\text{од}} k_{\text{дв}}$ .

АСУ ГС устойчива в смысле Гурвица, если

$$\left. \begin{aligned} a_i &> 0 \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n); \\ \Delta_j &> 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n), \end{aligned} \right\}$$

где  $\Delta_j$  — определители Гурвица.

Для устойчивости автоматической системы управления четвертого порядка (1), кроме положительности всех коэффициентов (2), необходимо соблюдение условия [4]:  $\Delta_3 > 0$  или

$$a_3 (a_1 a_2 - a_0 a_3) - a_4 a_1^2 > 0. \quad (3)$$

Выполняя условие (3) для характеристического уравнения (1), получим

$$\begin{aligned} & (k_0 \frac{c_1}{d_2} + 1) \left[ (T_1 T_{\text{дв}} + T_1 \frac{d_1}{d_2} + T_{\text{дв}} \frac{d_1}{d_2}) (T_1 + T_{\text{дв}} + \frac{d_1}{d_2} + k_0 \frac{c_0}{d_2}) - \right. \\ & \left. - T_1 T_{\text{дв}} \frac{d_1}{d_2} (k_0 \frac{c_1}{d_2} + 1) \right] - k_0 \frac{c_2}{d_2} (T_1 T_{\text{дв}} + T_1 \frac{d_1}{d_2} + T_{\text{дв}} \frac{d_1}{d_2})^2 > 0, \quad (4) \end{aligned}$$

где  $d_1 > 0, d_2 > 0, c_0 > 0, c_1 > 0, c_2 > 0$ .

Неравенство (4) представляет собой границу колебательной устойчивости системы. Рассмотрим условия устойчивости АСУ ГС при использовании различных типов регуляторов.

**Пропорциональный регулятор.** Положив в выражение (4)  $c_0 = c_1 = d_1 = 0$ , получим условие устойчивости системы с пропорциональным регулятором:

$$0 < \frac{c_2}{d_2} < \left(\frac{c_2}{d_2}\right)_{гр}, \quad (5)$$

где  $\left(\frac{c_2}{d_2}\right)_{гр} = \frac{T_1 + T_{дв}}{k_0 T_1 T_{дв}}$ .

Из условия устойчивости (5) следует, что при изменении постоянной времени объекта регулирования  $T_1$  область устойчивости системы видоизменяется. Если значение  $T_1$  велико, то коэффициент усиления П-регулятора становится близким к величине  $\frac{1}{k_0 T_{дв}}$ , а при уменьшении значения  $T_1$  — значительным по величине.

Пропорциональный регулятор с воздействием по второй производной. Положив в выражение (4)  $c_1 = d_1 = 0$ , получим условие устойчивости системы с пропорциональным регулятором с воздействием по второй производной:

$$0 < \frac{c_2}{d_2} < \frac{T_1 + T_{дв}}{k_0 T_1 T_{дв}} + \frac{c_0}{T_1 T_{дв} d_2}.$$

Граничное значение коэффициента усиления пропорционального регулятора с воздействием по второй производной отличается от коэффициента усиления П-регулятора на  $\frac{c_0}{T_1 T_{дв} d_2}$  единиц. Очевидно, что с ростом постоянной времени  $T_1$  значение указанной добавки уменьшается. При значительных величинах постоянной времени  $T_1$  воздействие по второй производной стано-

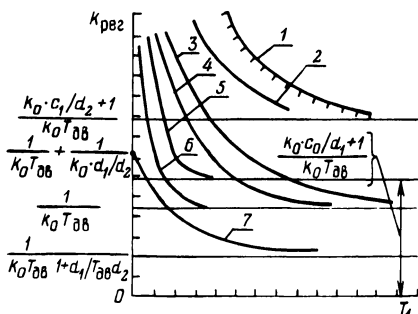


Рис. 1. Качественные оценки областей устойчивости системы при использовании различных типов регуляторов: 1 — П-регулятор с воздействием по первой и второй производным; 2 — ПД-регулятор; 3 — П-регулятор с воздействием по второй производной; 4 — П-регулятор; 5 — ПИД-регулятор; 6 — ПИ-регулятор; 7 — реальный И-регулятор.

вится не определяющим, а введение П-регулятора с воздействием по второй производной представляется нецелесообразным ввиду сложности его реализации при незначительном положительном эффекте.

Последовательно приравнивая коэффициенты регулятора нулю, можно получить еще тринадцать типов регуляторов и соответственно одиннадцать областей устойчивости в плоскости значений коэффициента усиления регулятора  $K_{рег}$  как функции постоянной времени  $T_1$  объекта регулирования

АСУ ГС. Идеальный И-регулятор и ИД-регулятор делают АСУ ГС структурно неустойчивой. Качественные оценки областей устойчивости системы представлены на рис. 1.

Оценка областей устойчивости выполнена при условии

$$c_1 > \frac{T_{дв}}{k_0 d_1} d_2^2.$$

Очевидно, что при уменьшении параметра  $c_1$  ПД-регулятора предельное значение  $k_{рег}$  с ростом  $T_1$  стремится к значению  $\frac{1}{k_0 T_{дв}}$ , а область устойчивости, ограниченная кривой 2, вырождается в область, ограниченную кривой 4. При уменьшении параметра  $d_1$  реального И-регулятора область устойчивости системы расширяется до области, ограниченной кривой 4. Указанная закономерность обусловлена вырождением регулятора в П-регулятор.

Качественные оценки при заданном изменении  $T_1$  и значении  $k_{рег}$  позволяют осуществить предварительный выбор типа регулятора АСУ ГС. При этом очерчивается область устойчивости системы в параметрах настройки выбранного типа регулятора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Д у б и л о в и ч В.М., К о с т ю к о в с к и й А.Г. О передаточной функции плоского гелиостата для солнечной электростанции. — Гелиотехника, 1981, № 5, с. 43–48. 2. Т е п л я к о в Д.И. Концентрирующая способность зеркальных систем СЭС класса ЭНИНа. — В сб.: Солнечные энергетические установки. М.: ЭНИН, 1974. — 135 с. 3. Д у б и л о в и ч В.М. Области устойчивости систем автоматического регулирования. — Минск: Вышэйшая школа, 1971. — 141 с. 4. Б е с е к е р с к и й В.А., П о п о в Е.П. Теория систем автоматического регулирования. — М.: Наука, 1975. — 768 с.

УДК 621.314.26

Б.И. ФИРАГО, канд.техн.наук,  
В.Г. СИДОРОВ, ассистент,  
С.Ю. ДОЛЖНИКОВ, мл.науч.сотр. (БПИ)

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПИТАНИИ ОТ ТИРИСТОРНОГО ЦИКЛОКОНВЕРТОРА

В связи с нелинейностью уравнений электромагнитных процессов в асинхронных двигателях (АД) строгий их анализ связан со значительными математическими трудностями.

Поэтому широкое распространение получили приближенные методы расчета электромагнитных процессов при линеаризации дифференциальных уравнений [1]. Несмотря на возрастающее использование вычислительной техники, "приближенные аналитические методы не потеряли своего значения, а остаются весьма полезными для практики" [2].

Один из методов приближенного учета электромагнитных процессов в АД основан на динамической характеристике [1]:

$$M + T_3 \frac{dM}{dt} = \frac{2 M_k}{s_k} s, \quad (1)$$

где  $M_k, s_k$  — соответственно критический момент и критическое скольжение АД,  $T_3$  — электромагнитная постоянная времени, равная

$$T_3 = \frac{1}{\omega_1 s_k}, \quad (2)$$

$\omega_1 = 2 \pi f_1$  — угловая частота сети;  $M, s$  — текущие значения электромагнитного момента и скольжения АД.

Примем метод [1] для исследования динамики АД при питании от тиристорного циклоконвертора, где переменными могут быть как частота, так и момент двигателя.

Линеаризуем уравнения АД, записанные для первой гармоники напряжения, при частотном управлении [3]:

$$M = \frac{3U_{\text{НОМ}}^2}{\omega_0 \text{НОМ}} \cdot \frac{R_r' s \gamma^2}{(b^2 + c^2 a_f^2) s^2 + 2R_s R_r' a_f s + (d^2 + e^2 a_f^2) R_r'^2}; \quad (3)$$

$$E = U_{\text{НОМ}} \gamma a_f \cdot \sqrt{\frac{R_r'^2 + X_r'^2 s^2}{(b^2 + c^2 a_f^2) s^2 + 2R_s R_r' a_f s + (d^2 + e^2 a_f^2) R_r'^2}}; \quad (4)$$

$$\omega_r = \omega_{0\text{НОМ}} (a_f - s); \quad (5)$$

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}; \quad (6)$$

$$a_f = \frac{f_2}{f_{\text{НОМ}}}; \quad s = \frac{\Delta \omega_r}{\omega_0 \text{НОМ}} = \frac{f_r}{f_{\text{НОМ}}}; \quad \gamma = \frac{U_s(1)}{U_{\text{НОМ}}};$$

$$\left. \begin{aligned} d &= \frac{R_s}{X_\mu}; \quad b = R_s \left(1 + \frac{X_r'}{X_\mu}\right); \quad e = 1 + \frac{X_s}{X_\mu}; \\ c &= X_s + X_r' + \frac{1}{X_\mu} X_s X_r', \end{aligned} \right\}$$

$U_{\text{НОМ}}, U_s(1)$  — соответственно действующие значения номинального и первой гармоники фазного напряжения статора АД;  $E$  — действующее значение ЭДС статора АД при данной частоте  $f_2$ ;  $\omega_0 \text{НОМ}, \Delta \omega_r$  — соответственно синхронная угловая скорость при номинальной частоте  $f_{\text{НОМ}}$  и абсолютное падение угловой скорости ротора;  $f_r$  — механическая частота ротора;  $R_s, X_s$  — активное и индуктивное сопротивления фазы статора при номинальной частоте;  $R_r', X_r'$  — приведенное активное и индуктивное сопротивления ротора при номинальной частоте;  $R_\mu, X_\mu$  — активное и индуктивное сопротивления ко-

нтура намагничивания при номинальной частоте;  $J$  — момент инерции электропривода.

Переходя к приращениям в уравнениях (1) — (6) и записывая их в операторной форме, получим

$$\left. \begin{aligned} (1+T_3) \Delta M(p) &= \mu_1 \Delta a_f(p) + \mu_2 \Delta s(p) + \mu_3 \Delta \gamma(p); \\ \Delta E(p) &= \eta_1 \Delta a_f(p) + \eta_2 \Delta s(p) + \eta_3 \Delta \gamma(p); \\ \Delta M(p) &= J (\omega_{0 \text{ ном}} p (\Delta a_f(p) - \Delta s(p)) + \Delta M_c(p), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 &= \frac{\partial M}{\partial a_f}; \quad \mu_2 = \frac{\partial M}{\partial s}; \quad \mu_3 = \frac{\partial M}{\partial \gamma}; \\ \eta_1 &= \frac{\partial E}{\partial a_f}; \quad \eta_2 = \frac{\partial E}{\partial s}; \quad \eta_3 = \frac{\partial E}{\partial \gamma}. \end{aligned} \right\}$$

Обозначим

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{\mu_1}{\mu_2}; \quad \epsilon_2 = \frac{\mu_3}{\mu_2}; \quad \epsilon_3 = \frac{1}{\mu_2}; \\ T_M &= \frac{J \omega_{0 \text{ ном}}}{\mu_2}. \end{aligned} \right\}$$

где  $T_M$  — электромеханическая постоянная времени электропривода.

Теперь, преобразуя (7), находим

$$\left. \begin{aligned} \Delta s(p) &= W_1(p) \Delta a_f(p) - W_2(p) \Delta \gamma(p) + W_3(p) \Delta M_c(p); \\ \Delta E(p) &= W_4(p) \Delta a_f(p) + W_5(p) \Delta \gamma(p) + W_6(p) \Delta M_c(p); \\ \Delta \omega_r(p) &= \omega_{0 \text{ ном}} (1 - W_1(p) \Delta a_f(p) + W_2(p) \Delta \gamma(p) - \\ &\quad - W_3(p) \Delta M_c(p)), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где

$$\left. \begin{aligned} W_1(p) &= \frac{p^2 T_3 T_M + p T_M - \epsilon_1}{p^2 T_3 T_M + p T_M + 1}; \\ W_2(p) &= \frac{\epsilon_2}{p^2 T_3 T_M + p T_M + 1}; \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} W_3(p) &= \frac{\epsilon_3 (1 + pT_3)}{p^2 T_3 T_M + pT_M + 1} ; \\ W_4(p) &= \eta_1 + \eta_2 W_1(p) ; \\ W_5(p) &= \eta_3 - \eta_2 W_2(p) ; \\ W_6(p) &= \eta_2 W_3(p) . \end{aligned} \right\}$$

Линеаризованные операторные уравнения регулятора с обратной связью по ЭДС [4] системы циклоконвертор-асинхронный двигатель (Ц-АД) можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_s(p) &= W_p(p) \Delta E_y(p) ; \\ \Delta E_y(p) &= F(p) \Delta a_f(p) - \kappa_{oc} \Delta E(p) ; \\ \Delta U_s(p) &= U_{ном} \Delta \gamma(p) ; \\ F(p) &= \kappa_a \Phi(p) , \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $W_p(p)$  – передаточная функция формирования управления;  $\Phi(p)$  – функция преобразователя сигнала;  $\kappa_{oc}$  – коэффициент обратной связи по ЭДС;  $\kappa_a$  – коэффициент пропорциональности в системе управления циклоконвертором, В/рад.

Объединив (8) и (9), находим уравнения замкнутой системы Ц-АД:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \gamma(p) &= W_7(p) \Delta a_f(p) - W_8(p) \Delta M_c(p) ; \\ \Delta \omega_r(p) &= W_9(p) \Delta a_f(p) - W_{10}(p) \Delta M_c(p) , \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где

$$W_7(p) = \frac{W_p(p) (F(p) - \kappa_{oc} W_4(p))}{U_{ном} + W_p(p) \kappa_{oc} W_5(p)} ;$$

$$W_8(p) = \frac{W(p) \kappa_{oc} W_6(p)}{U_{ном} + W_p(p) \kappa_{oc} W_5(p)} ;$$

$$W_9(p) = \omega_{о ном} (1 - W_1(p) + W_2(p) W_7(p)) ;$$

$$W_{10}(p) = \omega_{о ном} (W_3(p) + W_2(p) W_8(p)) .$$

Уравнениям (10) соответствует структурная схема, показанная на рис. 1

На основании (10) получаем передаточные функции системы Ц-АД:  
по заданию

$$\frac{\Delta \omega_r(p)}{\Delta \omega_s(p)} = 1 - W_1(p) + W_2(p) W_7(p),$$

где

$$\Delta \omega_s(p) = \omega_{0 \text{ ном}} \Delta a_f(p);$$

по возмущению

$$\frac{\Delta \omega_r(p)}{\Delta M_c(p)} = -W_{10}(p).$$

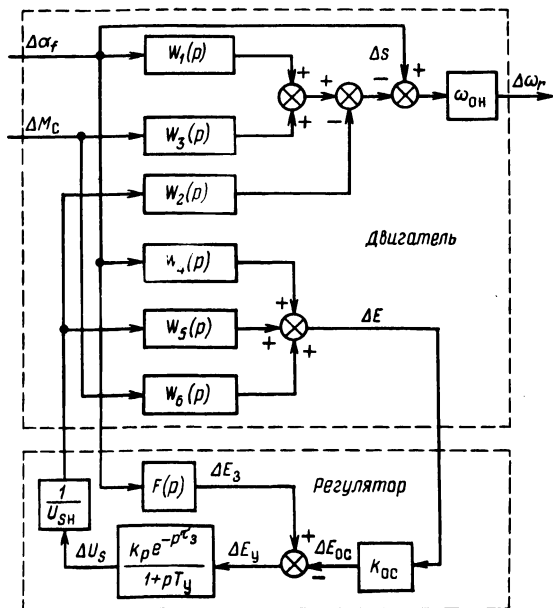


Рис. 1. Структурная схема замкнутой системы Ц-АД с обратной связью по ЭДС.

При использовании пропорционального регулятора с инерционным звеном и наличием задержки в системе управления циклоконвертором передаточная функция формирователя имеет вид

$$W_p(p) = \frac{k_p e^{-p\tau}}{1 + pT_y}, \quad (11)$$

где  $k_p$ ,  $T_y$ ,  $\tau$  — соответственно коэффициент усиления, постоянная времени и величина задержки формирователя управления.

С целью проверки достоверности рассмотренного анализа системы Ц-АД был рассчитан переходный процесс в системе Ц-АД при ступенчатом набросе частоты и момента. При этом задержка аппроксимирована выражением

$$e^{-p\tau} \approx 1 - p\tau.$$

Расчет переходного процесса проведен применительно к АД типа АО2-42-6 и трехфазно-трехфазного однополупериодного циклоконвертора [4,5] с регулятором, имеющим передаточную функцию (11) и при управлении двигателем по закону  $\Phi = \text{const}$ . Коэффициенты линеаризации дифференциальных уравнений системы определены в точке разложения, соответствующей  $a_f = 1/6$ ,  $M = 0,25 M_{\text{ном}}$ .

Система управления, регулятор и АД имели такие параметры:

$\kappa_p = 22$ ;  $F = 59,3$  В;  $\kappa_{oc} = 0,25$ ;  $\tau = 0,01$  с;  $T_y = 0,05$  с;  $T_M = 0,025$  с;  $T_3 = 0,024$  с.

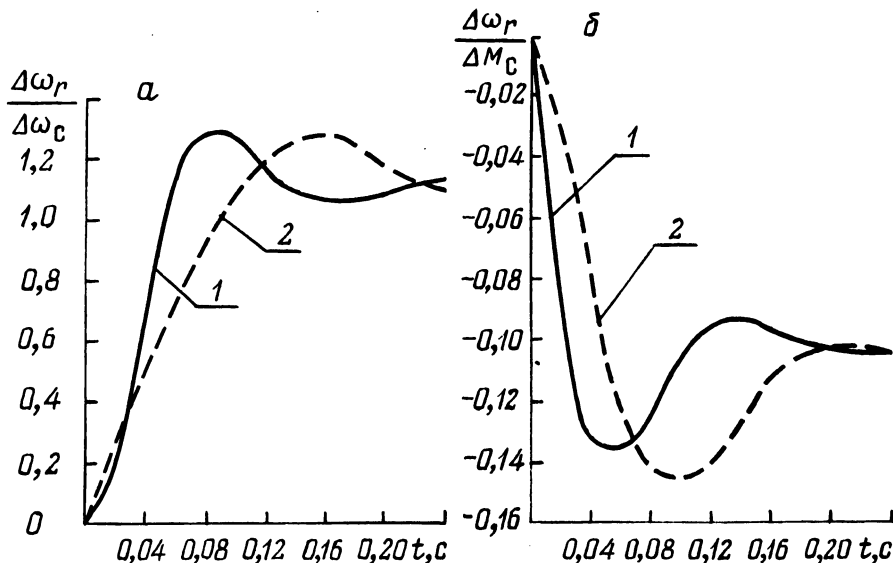


Рис. 2. Переходный процесс в замкнутой системе Ц—АД при набросе частоты с 8,33 до 10 Гц и  $M_c = 0,25 M_{\text{ном}}$  (а) и момента с  $0,25 M_{\text{ном}}$  до  $0,5 M_{\text{ном}}$  и  $f_2 = 8,33$  Гц (б); 1 — расчет; 2 — эксперимент.

Сопоставление расчетных кривых с опытными отражено на рис. 2, а, б.

Как видно из этих рисунков, приближенный учет электромагнитных процессов в АД дал достаточно хорошее совпадение расчетных кривых с экспериментальными: время переходного процесса и статизм практически совпадают по расчетным и экспериментальным кривым, различие в перерегулировании менее 5%. Основное расхождение состоит в фазовом сдвиге расчетных и экспериментальных кривых, что обусловлено в первую очередь конечным временем наброса частоты, момента и пренебрежением упругими элементами в агрегате.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Киркач Н.Ф., Гапонов В.С., Рогачевский В.М. Исследование переходного процесса электромеханической системы с асинхронным двигателем. — В кн.:



Вестник Харьковского политехнического института. — Харьков: ХПИ, 1977, т. 130, с. 75—77. 2. Т р е щ е в И.И. Методы исследования машин переменного тока. — Л.: Энергия, 1969. — 235 с. 3. Б у л г а к о в А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями. — М.: Наука, 1966. — 297 с. 4. Ф и р а г о Б.И., С и д о р о в В.Г. Частотно-регулируемый электропривод на основе однополупериодных циклоконверторов. — В кн.: Краткие тез. докл. к Всесоюз. н.—т. совещ. Вентильные автоматизированные электроприводы и преобразователи с улучшенными характеристиками (окт. 1978). — Л.: 1978, с. 98—101. 5. Б е л я е в В.П., С и д о р о в В.Г., Ф и р а г о Б.И. Система управления трехфазно-трехфазным однополупериодным тиристорным циклоконвертором. — В сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики. — Минск: Высшая школа, 1975, с. 186—191.

УДК 66.023/025:621.301.7

К.Г. СКАЧКО, канд.техн.наук,  
С.Н. ИВАНОВА, инженер,  
С.П. РЖЕВСКАЯ, инженер (БПИ)

## ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ ШУНТОВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНДУКТОРОВ

Индукционный нагрев токами промышленной частоты широко применяется в промышленности как наиболее экономичный среди других способов. Так, например, для синтеза изоляционных смол и других жидких диэлектриков используются химические реакторы — стальные сосуды цилиндрической формы емкостью до 32 м<sup>3</sup> с комплектом индукционных катушек, равным или кратным числу фаз питающей сети.

При расчете индукционных нагревателей приходится пользоваться приближенными методами с использованием схем замещения трансформаторов или основанными на теории поглощения электромагнитных волн в металле [1]. В качестве исходных данных обычно служат: мощность  $P$ , выделяемая в корпусе аппарата, габаритные размеры системы "индуктор-корпус" и электрофизические параметры нагреваемых материалов с учетом их зависимости от температуры. Конечная цель таких расчетов — определение числа витков  $w$  и конфигурации индукционных катушек с учетом их длительной работы.

Вместе с тем рассчитанные величины не всегда совпадают с экспериментальными вследствие наличия ряда трудно учитываемых факторов, например:

- а) все электрофизические параметры материала катушек и стали корпуса значительно изменяются при нагреве в широком диапазоне температур;
- б) магнитная проницаемость стали корпуса не остается постоянной и в большой степени зависит от напряженности магнитного поля  $H_c$  на поверхности стенки корпуса;
- в) краевые эффекты и величина зазора между корпусом и индуктором оказывают существенное влияние на энергетические показатели системы в целом, и т.д.

При значительном объеме вычислений, например для оптимизации тех или иных энергетических показателей, громоздкость расчетных соотношений и отсутствие физической наглядности применяемых формул затруд-

няют непосредственное использование этих методов в инженерной практике даже с применением ЭВМ.

Именно по этим причинам авторами предложена упрощенная методика расчета индукторов в замкнутых магнитных системах, основанная на классической теории цепей со сталью [2].

В связи с недостаточным опытом проектирования мощных индукционных установок в СССР и отсутствием в литературе достоверных данных авторами была предпринята попытка получить некоторые расчетные коэффициенты и зависимости экспериментальным путем на макете реактора, состоящем из котла, индукционной катушки и магнитных шунтов.

В соответствии с принципами физического моделирования котел изготовлен в масштабе 8:1 по отношению к размерам натурального образца реактора 12,5 м<sup>3</sup>, но с сохранением толщины стенки котла 10 мм, превышающей эквивалентную глубину проникновения электромагнитной волны в сталь на промышленной частоте.

Индукционная катушка бескаркасного типа выполнена из медной шины ( $w = 80$  витков) с таким расчетом, чтобы оставить относительно большой технологический зазор 20 мм для установки теплоизоляции.

Для локализации магнитного потока на стенку котла использованы съемные П-образного типа из пакетов электротехнической стали 1315. Магнитные шунты устанавливались радиально к стенке котла и охватывали индукционную катушку. Их количество (и соответственно площадь поперечного сечения) изменялось в процессе эксперимента. Выбор замкнутой магнитной системы облегчает условия работы индуктора, а также обуславливает независимость его геометрических размеров, расположения и влияния зазора на все параметры реактора в целом.

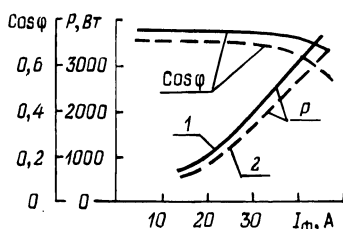


Рис. 1. Зависимость потребляемой мощности и  $\cos \varphi$  от тока индуктора: 1 — с полной магнитной системой (13 шунтов); 2 — с неполной магнитной системой (10 шунтов).

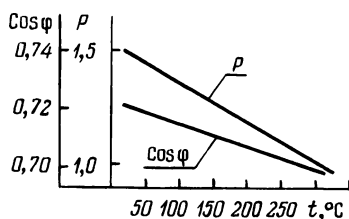


Рис. 2. Зависимость потребляемой мощности и коэффициента мощности от температуры.

Для снятия основных характеристик лабораторного макета и определения его параметров был применен известный метод "амперметра-вольтметра-ваттметра". Непосредственное измерение напряжения питания, рабочего тока и потребляемой активной мощности в условиях, близких к эксплуатационным, позволило косвенно определить полную мощность, коэффициент мощности, а также величины сопротивлений индуктора.

Определение основных магнитных величин (потока, индукции и напряженности магнитного поля) производилось в рабочих условиях по известному индукционному методу [3] с помощью измерительных обмоток. Полученные результаты измерений отличаются от расчетных не более чем на 10 %.

Для количественной и качественной оценки эксплуатационных возможностей макета в различных режимах работы определены зависимости потребляемой мощности и коэффициента мощности в функции тока при изменении уровня напряжения питания. Как следует из рис. 1, в диапазоне рабочих токов от 15 до 45 А (в зоне больших напряженностей магнитного поля  $H_c \geq 10$  кА/м) наблюдается практически линейная зависимость  $P = f(I)$  при постоянной величине коэффициента мощности.

Сравнение параметров макета при наличии и отсутствии магнитных шунтов показывает, что коэффициент мощности увеличивается от 0,478 (с разомкнутой системой) до 0,71, что соответствует условиям работы бесконечного проводящего полупространства при воздействии потока электромагнитной энергии [4].

Экспериментальные данные показывают, что недостаточное магнитное экранирование ухудшает энергетические показатели макета. Так, например, использование 10 шунтов вместо 13 обусловило снижение коэффициента мощности на 0,06 и вызвало рост потока рассеяния на 12 %. Это особенно заметно при больших напряженностях магнитного поля, соответствующих рабочим токам свыше 35 А. При этом замедляется и "темп" нарастания мощности при увеличении тока (рис. 1).

Зависимости потребляемой мощности  $P$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi$  от температуры представлены на рис. 2. В диапазоне  $+20$ — $+300$  °С практически наблюдается линейный спад потребляемой мощности в 1,5 раза вследствие повышения удельного объемного сопротивления. Коэффициент мощности снижается незначительно в связи с противоположным действием двух взаимно компенсирующих факторов при нагреве: некоторого увеличения сопротивления и небольшого увеличения глубины проникновения магнитного потока в сталь. По этой причине при расчетах индукторов во всем диапазоне рабочих температур можно считать коэффициент мощности практически неизменным.

Таким образом, полученные при исследовании макета характеристики и закономерности применимы к проектируемым индукторам с замкнутыми магнитными системами. Применение шунтов обуславливает повышение коэффициента мощности и снижение потоков рассеивания каждой индукционной катушки. При расчете индукторов можно принять линейный закон изменения потребляемой мощности от температуры. Во всем диапазоне рабочих температур можно считать коэффициент мощности неизменным.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б у а н о в Е.А., П а п у н ы р о в а Л.В., М а н у с о в Е.Б. Химическая аппаратура с индукционным обогревом. — М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, сер. ХМ-1, 1971. — 32 с.
2. Об инженерной методике расчета индукторов/С.Н. И в а н о в а, С.П. Р ж е в с к а я, К.Г. С к а ч к о, Е.П. Т и м о х о в. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1981, № 12. — 75 с.
3. Электротехнический справочник/Под общ. ред. проф. П.Г. Г р у д и н с к о г о, Г.Н. П е т р о в а, М.М. С о к о л о в а и др. — М.: Энергия, 1974. — 775 с.
4. Т у р о в с к и й Я. Техническая термодинамика/Пер. с польск. — М.: Энергия, 1974. — 488 с.

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ПИТАНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Повышение качества регулирования скорости асинхронного частотного электропривода предопределяет поиск наиболее рациональных преобразователей, обеспечивающих форму напряжения, близкую к синусоидальной. Распространенными являются решения, основанные на применении различных способов амплитудно-импульсной и широтно-импульсной модуляции [1]. Освоение отечественной промышленностью силовых транзисторов позволяет строить преобразователи с высокой частотой коммутации и тем самым обеспечить напряжение с минимальным содержанием высших гармоник.

Структурная схема системы, осуществляющей формирование напряжения путем слежения за эталонным сигналом  $\bar{U}_3$ , изображена на рис. 1. Релейный элемент РЭ имеет симметричные пороги переключения. Выходное напряжение  $\bar{U}_{\text{вых}}$  получается на выходе фильтра Z с передаточной функцией  $W_\Phi$ . Релейный элемент представляет собой трехфазный мостовой инвертор напряжения (рис. 2).

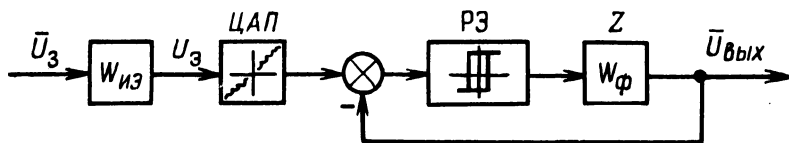


Рис. 1. Структурная схема преобразователя частоты.

Одним из основных элементов системы рис. 1 является источник эталонного (опорного) сигнала, задача которого — формирование напряжения заданной частоты и амплитуды в соответствии с законом частотного управления. Решение этого вопроса средствами аналоговой техники затруднено [2], особенно если учесть, что ИЭ должен генерировать многофазный сигнал по числу фаз преобразователя частоты. Функциональная схема разработанного трехфазного генератора синусоидальных колебаний низкой и инфранизкой частот, основанного на применении цифровой техники, представлена на рис. 3.

Импульсы с опорного генератора ГИ поступают на управляемый делитель частоты УДЧ, частота следования импульсов  $f_T$  на выходе которого пропорциональна коду выходной частоты (двоичный код 12 разрядов), поступившему с задатчика частоты. Сдвиг в  $120^\circ$  обеспечивается подачей синхросигналов с делителя Д, сдвинутых во времени на

$$T_c = \frac{4 \cdot M}{f_T \cdot m} ,$$

где  $M$  — число тактовых импульсов в четверти периода выходной частоты;  $m = 3$  — число фаз.

Узел, состоящий из счетчика  $C$ , логической схемы ЛС, реверсивного счетчика РС и схемы выбора направления счета НС, осуществляет кусочно-ли-

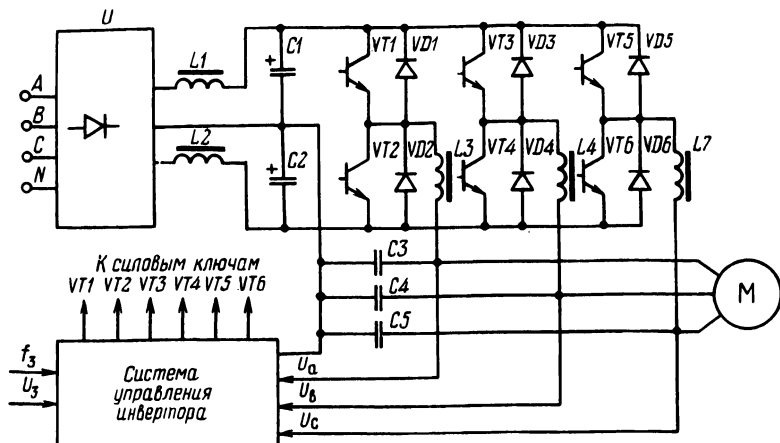


Рис. 2. Трехфазный мостовой инвертор напряжения.

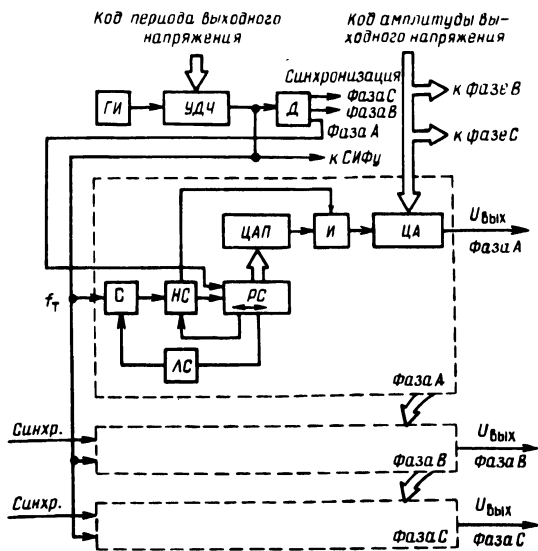


Рис. 3. Функциональная схема опорного генератора.

нейную аппроксимацию синусоидальной кривой на  $1/4$  периода. Число отрезков аппроксимации  $i$  равно 16. В табл. 1 представлены значения коэффициента счета  $K_{СЧ}$  счетчика  $C$  и количество циклов  $N_i$  счета с этим коэффициентом счета для каждого наклона аппроксимирующей прямой.

Т а б л и ц а 1. Аппроксимация синусоидальной кривой

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$K_{сч}$	71	30	23	19	17	15	14	12	11	10	9	8	7	6	5	4
$N_i$	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	4	5	10	17	40	68

Вторая четверть вследствие симметрии получается реверсированием счетчика РС. Реверсивный счетчик управляет цифро-аналоговым преобразователем ЦАП, на выходе которого напряжение представляет собой  $u = |U_m \sin \omega t|$ . Инвертированием в И одного полупериода получаем синусоиду. Цифровой attenuator ЦА предназначен для регулирования амплитуды опорного напряжения в соответствии с алгоритмом управления (например, для обеспечения постоянства потока  $\Phi_3$  асинхронного двигателя во всем частотном диапазоне).

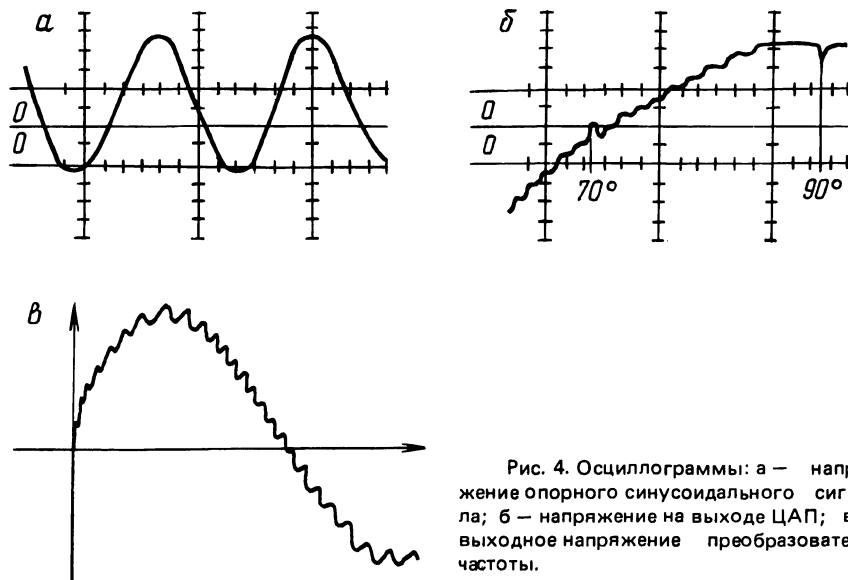


Рис. 4. Осциллограммы: а — напряжение опорного синусоидального сигнала; б — напряжение на выходе ЦАП; в — выходное напряжение преобразователя частоты.

В систему управления инвертора, кроме генератора опорного сигнала, входят компараторы, в которых происходит сравнение опорного напряжения с напряжением на выходе преобразователя, и распределитель импульсов, формирующий управляющие импульсы для транзисторных ключей. Система управления преобразователя частоты реализована на микросхемах серий К155, К553, К572, К293. Силовая часть выполнена на высоковольтных транзисторах КТ812А. Конструктивно преобразователь выполнен отдельным блоком размерами 390 x 200 x 635 мм. Технические параметры преобразователя следующие:

Диапазон частот — 0,5–100 Гц;

Выходное напряжение на частоте 50 Гц—220 В;

Номинальный ток — 10 А;  
Коэффициент гармоник — не более 12 %;  
Частота переключения ключей — 10 кГц;  
К.п.д. — 80 %.

Преобразователь работает совместно с электродвигателем 4А63В2УЗ, который снабжен датчиком ВЕ-178.

Управление приводом осуществляется или с пульта ручного задания или от управляющей машины ДЗ-28. На рис. 4 приведены осциллограммы, снятые с преобразователя частоты.

#### В ы в о д ы

Замена аналоговых способов формирования синусоидальных колебаний цифровыми позволяет получить высокую стабильность и низкий коэффициент гармоник.

Способ получения выходного напряжения путем отслеживания опорного напряжения обеспечивает получение высоких характеристик преобразователей частоты для питания асинхронных электродвигателей.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Структуры систем управления автоматизированным электроприводом/ О.П. И л ь и н, В.И. П а н а с ю к, Ю.Н. П е т р е н к о, В.П. Б е л я е в. — Минск: Наука и техника, 1978. — 367 с. 2. Б е л я е в В.П., И л ь и н О.П., П е т р е н к о Ю.Н. Синтез цифровой системы управления автономным инвертором с ШИМ на основе микропроцессора. — Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Киев, 1979, т. III. — 260 с.

УДК 621.318.435.001.24

Т.Т. РОЗУМ, канд.техн.наук (БПИ)

### РАСЧЕТ ДВУХКОНТУРНОЙ ФЕРРОРЕЗОНАНСНОЙ ЦЕПИ С ПОМОЩЬЮ НАПРАВЛЕННОГО ГРАФА

Двухконтурная феррорезонансная цепь (рис. 1) вызывает интерес исследователей [1–3] благодаря возможности возникновения в цепи как ультрагармонических, так и субгармонических колебаний. В некоторых случаях они нежелательны и предварительный расчет режима работы цепи позволяет избежать нежелательных явлений. Эти колебания находят и практическое использование. Так, возможность применения схемы в качестве преобразователя частоты без подмагничивания рассмотрена в [2], для осциллографического контроля магнитных свойств ферромагнетиков — в [3]. Авторы проводят экспериментальное исследование процессов в феррорезонансной цепи либо пользуются приближенными аналитическими методами анализа установившихся режимов.

В данной статье рассматривается методика расчета режимов работы цепи (рис. 1) на основе направленного графа. Алгоритм расчета позволяет получить как установившиеся, так и переходные процессы, при этом выбор типа аппроксимации кривой намагничивания стальных сердечников не имеет принципиального значения.

Уравнения состояния электрических и магнитных цепей записываем в относительных единицах. Учтем имеющие существенное значение для переходного режима малые активные сопротивления соединительных проводов и конденсаторов  $r$ , обмоток дросселей  $r_d$ :

$$\left. \begin{aligned} u &= r i_{c1} + u_{c1} + r i_{c2} + u_{c2}; \\ r i_{c1} + u_{c1} &= p \Psi_1 + r_d i_1; \\ r i_{c2} + u_{c2} &= p \Psi_2 + r_d i_2; \\ i &= i_{c1} + i_1; \quad i = i_{c2} + i_2; \\ -u_H &= p \Psi_1 - p \Psi_2; \\ i_1 + i_H &= sh \Psi_1; \quad i_2 - i_H = sh \Psi_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(здесь  $p = \frac{d}{dt}$  — оператор дифференцирования).

Решая уравнения (1) относительно каждой зависимой переменной в следующем виде:

$$i = \frac{u}{2r} - \frac{u_{c1}}{2r} - \frac{u_{c2}}{2r} + \frac{1}{2} i_1 + \frac{1}{2} i_2;$$

$$i_{c1} = i - i_1; \quad i_{c2} = i - i_2;$$

$$\Psi_1 = \frac{u_{c1}}{p} + \frac{r}{p} i_{c1} - \frac{r_d}{p} i_1;$$

$$\Psi_2 = \frac{u_{c2}}{p} + \frac{r}{p} i_{c2} - \frac{r_d}{p} i_2;$$

$$i_1 = sh \Psi_1 - i_H; \quad i_2 = sh \Psi_2 + i_H;$$

$$u_H = u_{c1} - u_{c2} - (r + r_d) i_1 + (r + r_d) i_2$$

и, воспользовавшись вспомогательными соотношениями

$$u_{c1} = \frac{1}{C_p} i_{c1}; \quad u_{c2} = \frac{1}{C_p} i_{c2}; \quad i_H = \frac{u_H}{r_H},$$

строим направленный граф исследуемой цепи (рис. 2).

Предложенная структура направленного графа обеспечивает наиболее устойчивую расчетную схему, наилучшую сходимость итераций в процессе вычислений, так как обратные связи графа отрицательны, передачи обратных связей не содержат операторов дифференцирования, а контуры обратной связи имеют не менее одного оператора интегрирования.

Наличие ненулевых начальных условий учтено путем введения в узлы графа  $u_{c1}$ ,  $u_{c2}$  дополнительных ветвей с сигналами  $u_{c1}^0$  и  $u_{c2}^0$ , соответствующими



щами напряжению конденсаторов до момента коммутации, а в узлы  $\Psi_1, \Psi_2$  — дополнительных ветвей с сигналами  $\Psi_1^0$  и  $\Psi_2^0$ , обусловленных остаточной намагиченностью сердечников.

Согласно структурной схеме графа расчет исследуемых величин в первом приближении на  $(k + 1)$ -м интервале осуществляется следующим образом.

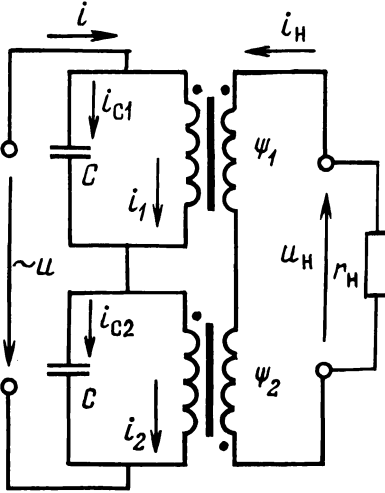


Рис. 1.

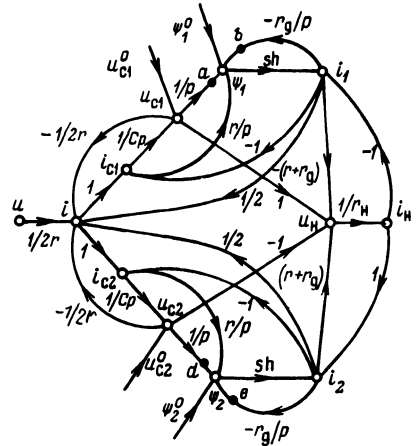


Рис. 2.

Токи источника питания и ветвей с конденсаторами

$$i_{k+1} = \frac{U_m \sin(t_{k+1} + a)}{2r} - \frac{u_{c1k}^{III}}{2r} - \frac{u_{c2k}^{III}}{2r} + \frac{1}{2} i_{1k}^{III} + \frac{1}{2} i_{2k}^{III};$$

$$i_{c1(k+1)} = i_{k+1} - i_{1k}^{III};$$

$$i_{c2(k+1)} = i_{k+1} - i_{2k}^{III}$$

(полагаем, что расчет в предыдущем интервале ограничивается третьей итерацией).

Напряжения на конденсаторах

$$u_{c1(k+1)} = \frac{1}{2C} (i_{c1(k+1)} + i_{c1k}^{III}) \Delta t + u_{c1k}^{III};$$

$$u_{c2(k+1)} = \frac{1}{2C} (i_{c2(k+1)} + i_{c2k}^{III}) \Delta t + u_{c2k}^{III}.$$

При этом следует учесть, что на первом интервале

$$u_{c1}^{III} = u_{c1}^0; u_{c2}^{III} = u_{c2}^0.$$

Потокоцепления дросселей

$$\Psi_{1(k+1)} = a_{k+1} + b_{k+1}^{\text{III}} + \Psi_1^0 ;$$

$$\Psi_{2(k+1)} = d_{k+1} + e_{k+1}^{\text{III}} + \Psi_2^0 .$$

где

$$a_{k+1} = \frac{1}{2} (u_{c1(k+1)} + u_{c1k}^{\text{III}}) \Delta t + a_k^{\text{III}} ;$$

$$d_{k+1} = \frac{1}{2} (u_{c2(k+1)} + u_{c2k}^{\text{III}}) \Delta t + d_k^{\text{III}} .$$

Токи дросселей и соответствующие им приращения потокоцепления по ветвям обратных связей —  $\frac{r_d}{p}$

$$i_1(k+1) = \text{sh } \Psi_{1(k+1)} - i_{\text{HK}}^{\text{III}} ;$$

$$i_2(k+1) = \text{sh } \Psi_{2(k+1)} + i_{\text{HK}}^{\text{III}} ;$$

$$b_{k+1} = - \frac{1}{2} r_d (i_1(k+1) + i_{1k}^{\text{III}}) \Delta t + b_k^{\text{III}} ;$$

$$e_{k+1} = - \frac{1}{2} r_d (i_2(k+1) + i_{2k}^{\text{III}}) \Delta t + e_k^{\text{III}} .$$

Напряжение и ток нагрузки

$$u_{\text{H}(k+1)} = u_{c1(k+1)} - u_{c2(k+1)} - (r + r_d) i_1(k+1) + (r + r_d) i_2(k+1) ;$$

$$i_{\text{H}(k+1)} = u_{\text{H}(k+1)} / r_{\text{H}} .$$

Контуры обратной связи графа определяют следующий порядок расчета на первой итерации:

$$i_{k+1}^{\text{I}} = \frac{U_m \sin(t_{k+1} + a)}{2r} - \frac{u_{c1(k+1)}}{2r} - \frac{u_{c2(k+1)}}{2r} + \frac{1}{2} i_1(k+1) + \\ + \frac{1}{2} i_2(k+1) ;$$

$$i_{c1(k+1)}^{\text{I}} = i_{k+1}^{\text{I}} - i_1(k+1) ;$$

$$i_{c2(k+1)}^{\text{I}} = i_{k+1}^{\text{I}} - i_2(k+1) ;$$

$$u_{c1(k+1)}^{\text{I}} = \frac{1}{2C} (i_{c1(k+1)}^{\text{I}} + i_{c1k}^{\text{III}}) \Delta t + u_{c1k}^{\text{III}} ;$$

$$u_{c2(k+1)}^{\text{I}} = \frac{1}{2C} (i_{c2(k+1)}^{\text{I}} + i_{c2k}^{\text{III}}) \Delta t + u_{c2k}^{\text{III}} ;$$

$$a_{k+1}^{\text{I}} = \frac{1}{2} (u_{c1(k+1)}^{\text{I}} + u_{c1k}^{\text{III}}) \Delta t + a_k^{\text{III}} ;$$

$$\Psi_1^I(k+1) = a_{k+1}^I + b_{k+1} + \Psi_1^0;$$

$$d_{k+1}^I = \frac{1}{2} (u_{c2}^I(k+1) + u_{c2}^{III}k) \Delta t + d_k^{III};$$

$$\Psi_2^I(k+1) = d_{k+1}^I + e_{k+1} + \Psi_2^0;$$

$$i_1^I(k+1) = \text{sh} \Psi_1^I(k+1) - i_H(k+1);$$

$$i_2^I(k+1) = \text{sh} \Psi_2^I(k+1) + i_H(k+1);$$

$$b_{k+1}^I = -\frac{1}{2} r_g (i_1^I(k+1) + i_1^{III}k) \Delta t + b_k^{III};$$

$$e_{k+1}^I = -\frac{1}{2} r_g (i_2^I(k+1) + i_2^{III}k) \Delta t + e_k^{III};$$

$$u_H^I(k+1) = u_{c1}^I(k+1) - u_{c2}^I(k+1) - (r + r_d) i_1^I(k+1) + (r + r_d) i_2^I(k+1);$$

$$i_H^I(k+1) = u_H^I(k+1) / r_H.$$

Уточнение полученных значений осуществляем в процессе итерационной обработки.

Для практической реализации предложенной методики расчета использована двухконтурная феррорезонансная цепь, исследованная на АВМ в работе [2]. На рис. 3 приведены расчетные кривые магнитной индукции одного из

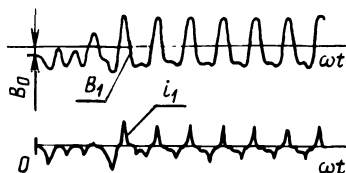


Рис. 3.

сердечников  $B_1(\omega t)$  и тока  $i_1(\omega t)$  при включении цепи на напряжение  $u = 300 \sin(\omega t + 30^\circ)$ ,  $B$  и наличии остаточной индукции в сердечниках  $B_0 = \pm 0,8$  Тл. Расчет выполнен с интервалом  $\Delta t = 10^0$  при трех итерациях. Расчетные характеристики практически совпадают с результатами осциллографирования в [2].

#### ЛИТЕРАТУРА

- Хаяси Т. Нелинейные колебания в физических системах. — М.: Мир, 1968. — 420 с.
- Горбарук В.Н., Тишечкин А.А. Исследование двухконтурной феррорезонансной схемы на аналоговой вычислительной машине. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1975, № 2, с. 105—109.
- Саврасов В.Н. К вопросу исследования колебаний в двухконтурной феррорезонансной схеме. — Изв. вузов СССР. Электромеханика, 1963, № 8, с. 899—906.

Г. И. БАЛУЕВА, канд. техн. наук,  
О. П. ИЛЬИН, канд. техн. наук (БПИ),  
В. Б. ИГНАТОВИЧ, инженер (МПО "Химволокно")

## К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАМЕНЫ ИМПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫМИ АНАЛОГАМИ

Успехи хозяйственного строительства в десятой пятилетке обеспечили существенный рост внешних экономических связей СССР, позволили нашей стране шире использовать преимущество международного разделения труда для целей экономического и социального развития.

Внешнеторговый советский оборот по его рыночной стоимости, т.е. по фактическим ценам мирового рынка, вырос с 50,7 млрд. руб. в 1975 г. до 94,1 млрд. руб. в 1980 г. Число стран наших торговых партнеров увеличилось за истекшие пятилетки со 115 до 139. За годы десятой пятилетки для нужд народного хозяйства было ввезено из-за границы продукции на общую сумму 176 млрд. руб., в том числе машин и оборудования на 66 млрд. руб., что в действующих ценах более чем в 2 раза превышает аналогичный показатель за 1971–1975 гг. [1].

Большое значение придавалось вводу комплектного оборудования, обеспечивающего ускорение освоения прогрессивных технологических процессов. За годы пятилетки в различных отраслях народного хозяйства было установлено около 1,2 тысячи комплектов закупленного за рубежом оборудования на сумму 7,2 млрд. руб.

С использованием импортного оборудования в десятой пятилетке введены в строй Камский автомобильный завод, Оренбургский газопромышленный комплекс и магистральный газопровод "Союз", около четырех десятков химических заводов, выпускающих серную кислоту, аммиак, полиэфирные нити и другую продукцию.

К числу наиболее активных торговых партнеров из капиталистических стран относится ФРГ, товарооборот с которой возрос с 2,8 млрд. руб. в 1975 г. до 5,8 млрд. руб. в 1980 г. Например, фирма "UDE" поставляет завод для производства полиэфирных нитей. Для производственного объединения "Химволокно" (г. Могилев) закуплены прядильные машины с комплектным электрическим оборудованием. Управление их работой осуществляется электроприводами со статическими преобразователями частоты (СПЧ), выполненными на основе силовой полупроводниковой техники с широким использованием микроэлектроники. Микросхемы и электронные элементы собраны на специальных печатных платах (картах), управляющих работой агрегатов секстет, осуществляющем прядение нитей, и жгутуюкладчик, укладывающий готовый жгут в специальные емкости — тазы. Работа обоих аппаратов строго синхронизирована.

В процессе работы, особенно в период освоения и приработки, происходят отказы отдельных элементов оборудования, на устранение которых используются комплекты запасных частей, поставляемые с оборудованием. Централизованная поставка запчастей импортного оборудования организова-

на значительно хуже, чем поставка самого оборудования. Это вызывает большие затруднения при эксплуатации и ремонте. В связи с этим возникает необходимость замены элементов импортного оборудования советскими аналогами.

В некоторых отраслях промышленности, например автомобилестроении, за границей закупаются только те запчасти, которым нет отечественных аналогов. Такая замена оправдывает себя, так как дает большую экономию валютных средств и позволяет удлинить срок службы импортного оборудования.

Система управления СПЧ агрегатом секстет состоит из 32 стандартных печатных плат, а жгутоукладчиком — из 8. При эксплуатации выявилась неодинаковая интенсивность отказов различных плат. Перечень наиболее часто отказывавших плат приведен в табл. 1. В связи с высокой интенсивностью отказов указанных плат и отсутствием резерва импортных запчастей была проанализирована возможность их замены отечественными аналогами. Платы были изготовлены в БПИ и переданы в эксплуатацию, которая показала их хорошие эксплуатационные качества и соответствие техническим требованиям по качеству управления технологическим процессом.

Экономический эффект от замены импортных плат отечественными аналогами состоит в продлении срока службы закупленного оборудования и экономии валютных средств при отказе от закупки запасных частей по импорту.

Для определения экономического эффекта от замены плат СПЧ необходимо рассчитать стоимость отечественных аналогов. Так как потребное количество плат невелико, расчет их стоимости произведен нами для условий индивидуального производства.

Смета затрат на изготовление двухслойной платы и монтаж приборов и средств автоматизации состоит из следующих статей: покупные изделия и полуфабрикаты с учетом транспортно-заготовительных расходов; основная и дополнительная зарплата производственных рабочих; отчисления в фонд социального страхования; накладные расходы; комплектная регулировка; стоимость изготовления двухслойной платы.

Плата состоит из собственно двухслойной печатной платы и смонтированных на ней электронных элементов (микросхем, диодов, триодов и т.д.).

Стоимость импортных печатных плат в западногерманских марках взята из документации ФРГ на быстроизнашивающиеся запасные части. Цена советских аналогов определена по прейскурантам оптовых цен на радиоэлектронные элементы и их монтаж.

Сводный расчет стоимости одного комплекта из 10 импортных плат и отечественных аналогов представлен в табл. 1.

Экономический эффект от замены импортного оборудования отечественными аналогами в соответствии с [2] определяется из выражения

$$\mathcal{E} = \left( \frac{B_{и}}{X_{в}} - Z_{а} \right) A_{к},$$

где  $\mathcal{E}$  — экономический эффект, руб.;  $B_{и}$  — полные валютные затраты на оплату импортного товара и его доставку до границы в валюте страны-импорте-

Т а б л и ц а 1. Сводный расчет стоимости одного комплекта заменяемых плат СПЧ жгутоукладчика и секстета

Наименование заменяемой платы	Назначение	Количество на 1 машину	Стоимость одной платы	
			импортной в западно-германских марках	отечественного аналога, руб.
СПЧ жгутоукладчика				
NJ 2-02-0	Стабилизированный двухполярный источник питания	1	976	131
R U 3-02-1	Регулировка параметров преобразователя	1	1908	277
SU 2а-02-1	Предохранительная плата	1	1819	281
SU 3U-01-7	Формирователь импульсов выпрямителя	2	1784	257
Z U 1-01-0	Усилитель импульсов инвертора	1	667	208
L U 2-01-0	Задающий генератор и формирователь импульсов инвертора	1	2234	197
Итого на 7 плат СПЧ секстета			11172	1608
АЕГ 29.2308.6090	Технология и контроль напряжения цепи управления	1	1609	140
U1x25	Формирователь импульсов инвертора анодной группы	1	1481	135
U1x26	Формирователь импульсов инвертора катодной группы	1	1481	135
Итого на 3 платы			4571	410
Всего на комплект из 10 плат			15743	2018
Транспортно-заготовительные расходы 5 %			—	101
Всего			15743	2119

ра;  $X_B$  — курс иностранной валюты;  $Z_a$  — приведенные затраты на отечественный аналог оборудования;  $A_K$  — количество единиц заменяемого оборудования.

Удельные приведенные затраты отечественного аналога представляют собой его цену. Однако если разработке аналога предшествуют научные исследования, их стоимость необходимо включить в приведенные затраты в виде дополнительных капитальных вложений. Тогда

$$Z_a = E_H K_{\text{нир}} + C_a,$$

где  $E_H$  — нормативный коэффициент эффективности дополнительных капитальных вложений;  $K_{\text{нир}}$  — стоимость НИР в расчете на единицу аналога, руб./ед.;  $C_a$  — стоимость единицы аналога, руб.

В нашем случае единицей учета является один комплект из 10 заменяе-

мых печатных плат СПЧ жгутоукладчика и секстета. Тогда экономический эффект от замены одного комплекта плат СПЧ прядильных машин

$$\mathcal{E} = \left[ \frac{B_i}{X_B} - (E_n K_{\text{нир}} + C_a) \right] N_K,$$

где  $\mathcal{E}$  — экономический эффект от замены комплекта из 10 печатных плат СПЧ секстета и жгутоукладчика прядильных машин, руб.;  $N_K$  — число заменяемых комплектов плат;

$$K_{\text{нир}} = \frac{K_{\text{этапа}}}{N_K}.$$

Здесь  $N_K = 18$ ;  $K_{\text{этапа}}$  — стоимость соответствующих этапов НИР;  $K_{\text{этапа}} = 20000$  руб. Значение экспортного эквивалента не постоянно, оно подвержено изменениям в соответствии с изменением курса иностранных валют. По данным Государственного банка СССР, с 8 октября 1981 г. курс немецких марок ФРГ составляет за 100 марок 32,1 руб. [3]. Тогда

$$X_B = \frac{100}{32,1} = 3,115.$$

Экономический эффект без учета резерва плат

$$\mathcal{E} = \left[ \frac{15743}{3,115} - \left( 0,15 \frac{20000}{18} + 2119 \right) \right] 18 = [5054 - (166,67 + 2119)] 18 = 49830 \text{ руб.}$$

Так как для нормальной эксплуатации СПЧ необходим резерв запасных частей, а в комплекте заменяемых плат каждая из них представлена в одном экземпляре (за исключением платы SI3U — 0,1—7, которых в комплекте 2), то резерв должен составлять 100 % плат. Экономический эффект от замены импортных запасных частей советскими аналогами при наличии 100 %-ного резерва составит

$$\mathcal{E} = \left[ \frac{15743}{3,115} - \left( \frac{0,15 \cdot 20000}{2 \cdot 18} + 2119 \right) \right] 2 \cdot 18 = (5054 - 2202,33) 36 = 102660 \text{ руб.}$$

Исследование технических характеристик статических преобразователей частоты для привода агрегата секстет и жгутоукладчик в целом показало, что они могут быть заменены отечественными аналогами: преобразователь привода секстета ZIUF 19/380 фирмы AEG (ФРГ) — отечественным преобразователем ЭКТ-63/380; преобразователь ZDE-40 — преобразователем ЭКТ-20/380.

Стоимости преобразователей представлены в табл. 2.

Разница в стоимости одного комплекта из двух преобразователей

$$\Delta K = K_{\text{и}} - K_{\text{о}} = 77712 - 11494 = 66218 \text{ руб.}$$

Т а б л и ц а 2. Стоимость СПЧ

Статьи затрат	Наименование преобразователей		
	ЗИУФ 19/380 и АЕГ-40	ЭКТ-63/380	ЭКТ-20/380
Стоимость преобразователя, руб.	66643	6100	4550
Проектная документация, транспортно-заготовительные расходы, % кредита, руб.	1069	—	—
Транспортно-заготовительные расходы 2 %-ной стоимости, руб.	—	121	90
Комплектная регулировка и монтаж 6 %-ной стоимости, руб.	—	363	270
Всего	77712		11494
Источник информации	Документация ФРГ на СПЧ	Прейскурант № 15-05-1971/37 утв.17.10.78 г.	

Необходимость в замене комплекта преобразователей в целом может возникнуть в случае отказа плат, которым нет отечественных аналогов, и отсутствия запаса. Исправные элементы замененных преобразователей могут быть использованы в качестве запасных частей для ремонта других СПЧ. Это снизит затраты на ремонт, так как уменьшится потребное количество отечественных аналогов плат.

В целом в отрасли на аналогичных предприятиях можно будет отказаться от закупки импортных СПЧ пряядильных машин и заменить их советскими аналогами. Экономический эффект по отрасли определится по выражению

$$\mathcal{E}_{\text{отр}} = \Delta K \cdot M,$$

где  $M$  — предполагаемый объем внедрения отечественных СПЧ пряядильных машин.

Таким образом, замена импортного электрооборудования пряядильных машин и его отдельных элементов отечественными аналогами экономически целесообразна. Она позволяет решить проблему дефицита запасных частей к импортному оборудованию, продлить период его эксплуатации и экономит значительные валютные средства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Внешняя торговля в СССР в 1980 г. — Экономическая газета, 1981, № 13. 2. Методика определения годового экономического эффекта от создания и внедрения новой техники, изобретений и рационализаторских предложений в химической промышленности. — М., Химическая промышленность, 1978. — 83 с. 3. Бюллетень курсов иностранных валют с 8 октября 1981 г. — Экономическая газета, 1981, № 41.



### СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ РЕЛЕЙНОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В работе предлагается методика, в значительной мере облегчающая решение задачи синтеза оптимальной релейной системы стабилизации частоты вращения электропривода.

Пусть возмущенное движение системы с объектом  $n$ -го порядка, к которому приложено одно управление  $U^l$  и одно возмущение  $F(t)$ , в пространстве отклонений координат  $x_j$  описывается системой линейных дифференциальных уравнений

$$\dot{x}_i = - \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + m^l U^l + l F; \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $a_{ij}$ ,  $m^l$ ,  $l$  — постоянные коэффициенты.

Выполним преобразование координат [1], тогда движение в фазовом пространстве нормальных переменных состояния [3] будет описываться системой дифференциальных уравнений

$$\dot{y}_j = y_{j+1}; \quad \dot{y}_n = - \sum_{i=1}^n b_{ni} y_i + m U; \quad j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где коэффициенты  $b_{ni}$ ,  $m$  и управление  $U$  выражаются через исходные коэффициенты объекта  $a_{ij}$ ;  $m^l$  и управление  $U^l$  — посредством уравнений связи [1].

Управление  $U$ , доставляющее минимум функционалу

$$I = \int_0^{\infty} \left( \sum_{i=1}^n \lambda_{ij} y_i^2 \right) dt, \quad (\lambda_{ij} = 0 \text{ при } i \neq j), \quad (3)$$

при ограничениях [2]

$$|U| \leq U_m; \quad U_m \int_0^{\infty} \sum_{i=1}^n \gamma_{ni} |y_i| dt < \frac{1}{2} \sum_{j,p=1}^n \gamma_{jp} [y_j(0) y_p(0)]$$

имеет вид

$$U = - U_m \operatorname{sign} \sum_{i=1}^n \gamma_{ni} y_i. \quad (4)$$

Используя результаты [1,2], можно доказать, что коэффициенты искомого уравнения (4) при заданных весовых множителях функционала (3) являются решением совокупности  $n$ -линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{i=1}^n (-1)^{i-1} (b_{nk-i} \gamma_{nk+1} + b_{nk+i} \gamma_{nk-i}) = b_{nk} \gamma_{nk} - \frac{1}{2} \lambda_{kk}, \quad (5)$$

где  $\gamma_{nj} = 0$  при  $0 \geq j > n$ ;  $b_{nj} = 0$  при  $0 \geq j > n+1$ ;  $b_{nj} = 1$  при  $j = n+1$ .

Благодаря асимптотической устойчивости системы (2) изображающая точка в фазовом пространстве приближается к началу координат и при этом существует скользящий режим, если [2]

$$m \gamma_{nn} U_m \geq \left| \sum_{i,j=1}^n \gamma_{ni} b_{ij} y_j \right|. \quad (6)$$

Для рассматриваемых систем стабилизации выбором  $m, U_m, \gamma_{ni}$  можно или вообще исключить или обеспечить пренебрежимо малое время движения по кускам фазовых траекторий с переключением на гиперплоскости

$$\sum_{i=1}^n \gamma_{ni} y_i \equiv 0 \quad (7)$$

до момента возникновения скользящего режима.

Следовательно, основное (или единственное) движение изображающей точки системы (2) будет происходить в гиперплоскости (7) и описываться уравнениями

$$\dot{y}_j = y_{j+1}; \quad \dot{y}_{n-1} = - \frac{1}{\gamma_{nn}} \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_{ni} y_i. \quad (8)$$

Движение системы, определяемое уравнениями (8), не зависит от параметров объекта и возмущающего воздействия, т.е. система (1) с релейным управлением, аргументами которого является линейная комбинация обратных связей по переменным состояния, будет нечувствительной к параметрическим и внешним возмущениям.

Таким образом, характер скользящего движения в плоскости (7) будет определяться только значениями коэффициентов  $\gamma_{ni}$ . На этом основании укажем простой путь их нахождения, не затрагивая проблемы задания весовых множителей функционала (3).

Решая (8) относительно высшей производной, получим

$$\dot{y}^{(m)}(t) = - \frac{1}{\gamma_{nn}} \sum_{i=1}^m \gamma_{ni}^{(i-1)} y^{(i-1)}(t), \quad (m = n-1). \quad (9)$$

Зададимся регулируемой величиной объекта (8) в переходном процессе путем выбора требуемого линейного однородного дифференциального уравнения и найдем из него "желаемую" высшую производную [4]:

$$\dot{y}_ж^{(m)}(t) = - \sum_{i=1}^m a_{m+1-i} y^{(i-1)}(t). \quad (10)$$

Следуя [4], приравняем правые и левые части равенств (9) и (10), после чего получим выражения для нахождения коэффициентов  $\gamma_{ni}$  при свободно назначаемом  $\gamma_{nn}$ :

$$\gamma_{ni} = \gamma_{nn} \cdot a_{m+1-i}. \quad (11)$$

В этом случае (для проверки существования скользящего режима) более удобным оказывается следующее условие, полученное с учетом выражений (6), (7) и (11):

$$mU_m \geq \sum_{i=1}^m | [ a_{m+1-i} + a_{m-i} (b_{nn} - a_1) - b_{ni} ] y_i(0) |, \quad (12)$$

где  $y_i(0)$  — заданные начальные условия.

Рассмотрим в качестве примера процедуру синтеза релейной системы оптимального управления электроприводом постоянного тока с неизменным потоком возбуждения двигателя и регулируемым источником в цепи якоря (рис. 1), для которой коэффициенты уравнения (1) имеют вид [1]

$$a_{12} = 1/\theta; \quad a_{21} = 1/T; \quad a_{33} = 1/T_p; \quad m' = \beta_p/T_p; \quad l = a_{12}.$$

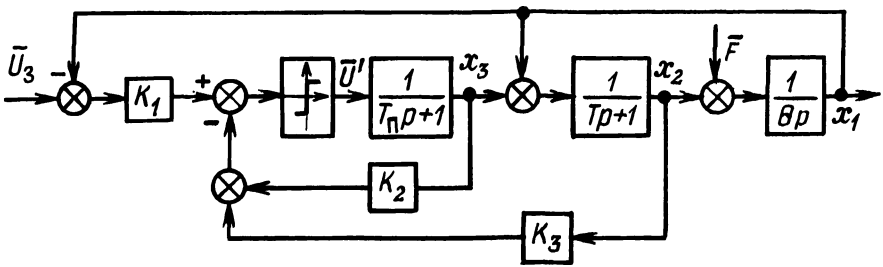


Рис. 1. Структурная схема оптимальной релейной системы.

Выполним преобразование координат, приняв, что возмущение  $F$  в виде ступенчатой функции прикладывается к объекту при  $t = 0^-$  [1]. При этом

$$y_1 = x_1 + \nu F; \quad y_2 = a_{12} (x_2 - F); \quad y_3 = a_{12} a_{21} (-x_1 - x_2 + x_3). \quad (13)$$

Коэффициенты уравнения (2) будут

$$b_{31} = a_{12} a_{21} a_{33}; \quad b_{32} = a_{21} (a_{12} + a_{33}); \quad b_{33} = a_{21} + a_{33}; \quad (14)$$

$$m = \beta_p b_{31}; \quad U = U' - (1 - \nu) F / \beta_p.$$

Искомый алгоритм оптимального управления  $U'$  с учетом выражений (4), (13), (14) будет иметь вид

$$U' = (1 - \nu) F / \beta_p - U_m \operatorname{sign} [ K_1 x_1 + K_2 x_2 + K_3 x_3 + (K_{\nu F} - K) F ], \quad (15)$$

где

$$K_1 = \gamma_{31} - a_{12} a_{21} \gamma_{33}; \quad K_2 = a_{12} (\gamma_{32} - a_{21} \gamma_{33});$$

$$K_3 = a_{12} a_{21} \gamma_{33}; \quad K_{\nu F} = \nu \gamma_{31}; \quad K_F = a_{12} \gamma_{32},$$

что соответствует комбинированному регулированию. При регулировании по отклонению, пренебрегая первым слагаемым в выражении (15), получим

$$U' = - U_m \operatorname{sign} ( K_1 x_1 + K_2 x_2 + K_3 x_3 ).$$

Т а б л и ц а 1. Коэффициенты уравнений для настройки регуляторов оптимальной релейной системы стабилизации частоты вращения электропривода

№№	m	$\sigma, \%$	$t_p, c$	$\nu \theta$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$
1	2	4,0	9,75/a	0,353/a	5,656 a	2,83 a a <sub>1</sub>				
2	3	7,1	1,18/a	0,400 /a	10,90 a	5,00 a a <sub>1</sub>	2,50 a a <sub>2</sub>			
3	4	12,0	1,23/a	0,465/a	14,56 a	7,32 a a <sub>1</sub>	4,28 a a <sub>2</sub>	2,15 a a <sub>3</sub>		
4	5	9,5	1,26/a	0,523/a	20,09 a	10,03 a a <sub>1</sub>	6,20 a a <sub>2</sub>	3,83 a a <sub>3</sub>	1,91 a a <sub>4</sub>	
5	6	12,0	1,25/a	0,602/a	24,70 a	12,37 a a <sub>1</sub>	7,83 a a <sub>2</sub>	5,23 a a <sub>3</sub>	3,31 a a <sub>4</sub>	1,66 a a <sub>5</sub>
6	2	4,5	0,62/a	0,599/a	6,30 a	3,21 a a <sub>1</sub>				
7	3	3,3	0,72/a	0,311/a	9,63 a	17,90 a a <sub>1</sub>	4,22 a a <sub>2</sub>			
8	4	4,8	0,67/a	0,237/a	44,44 a	22,19 a a <sub>1</sub>	5,45 a a <sub>2</sub>	2,72 a a <sub>3</sub>		
9	5	4,0	0,87/a	0,368/a	15,89 a	14,74 a a <sub>1</sub>	6,65 a a <sub>2</sub>	5,19 a a <sub>3</sub>	2,08 a a <sub>4</sub>	
10	6	4,0	0,91/a	0,529/a	71,34 a	35,55 a a <sub>1</sub>	15,54 a a <sub>2</sub>	8,66 a a <sub>3</sub>	3,78 a a <sub>4</sub>	1,89 a a <sub>5</sub>

При этом будет иметь место относительное отклонение частоты вращения [1]

$$\nu = a_{12}\gamma_{32}/\gamma_{31} = a_{12}a_{m-1}/a_m.$$

Если заданы весовые коэффициенты функционала (3), то решив (5), найдем искомые коэффициенты:

$$\gamma_{31} = \lambda_{11}/2b_{31}; \gamma_{32} = (b_{33}^2 \lambda_{11} + b_{31}b_{33}\lambda_{22} + b_{31}^2 \lambda_{33})/A;$$

$$\gamma_{33} = (b_{33}\lambda_{11} + b_{31}\lambda_{22} + b_{31}b_{32}\lambda_{33})/A; A = 2b_{31}(b_{32}b_{33} - b_{31}).$$

Рассмотрим также случай, когда весовые множители функционала не заданы. Выберем в качестве "желаемого" уравнение второго порядка, характеристический полином которого соответствует фильтру Баттерворта. Рассчитанные коэффициенты уравнений более высокого порядка, а также соответствующие им значения перерегулирования  $\sigma$ , времени регулирования  $t_p$  и  $\nu$  приведены в табл. 1. Здесь  $a$  — коэффициент, учитывающий ограничение производной тока якоря [1]. Тогда, при произвольно выбранном  $\gamma_{33}$ , найдем

$$\gamma_{32} = a_1 \gamma_{33} = 5,656 a \gamma_{33}; \gamma_{31} = a_2 \gamma_{33} = 2,83 a a_1 \gamma_{33}.$$

После определения этих коэффициентов следует выполнить проверку условия (12), а затем найти коэффициенты  $K_1, K_2, K_3$ .

Пусть, например,  $a_{12} = 2,5; a_{21} = 20; a_{33} = 50; a \leq 20 I_H/c; \beta_n U_m = 200 \text{ В}; F = 20 \text{ В}$ . Примем  $\gamma_{33} = 0,001$ , тогда  $\gamma_{32} = 0,113; \gamma_{31} = 6,402; K_1 = 6,352; K_2 = 0,232; K_3 = 0,05; \nu = 0,044; \sigma = 4,0\%; t_p = 0,0375 \text{ с}$ .

Убедимся в выполнении условия (12), которое с учетом максимальных значений  $y_{1m} = y_1(0) = \nu F; y_{2m} = y_2(0) = -a_{12}F$  можно записать

$$\frac{\beta_n U_m}{F} = 10 > \frac{a_{12}}{b_{31}} \left| 2a_1 (b_{33} - a_1) - b_{31} \frac{a_1}{a_2} + a_2 - b_{31} \right| = 4,45.$$

Таким образом, движение происходит полностью в скользящем режиме, а его характер соответствует "техническому" оптимуму.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А н х и м ю к В.Л., С л у к а М.П. Аналитическое конструирование линейных регуляторов для систем стабилизации частоты вращения электропривода. — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1981, вып. 8, с. 165–171.
2. К р а с о в с к и й А.А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. — М.: Наука, 1973. — 240 с.
3. К в а к е р н а к Х., С и в а н Р. Линейные оптимальные системы управления. — М.: Мир, 1977. — 650 с.
4. Б о й ч у к Л.М. Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления. — М.: Энергия, 1971. — 112 с.

## ТРАНЗИСТОРНЫЙ РЕГУЛЯТОР НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Анализ оборудования различных цехов предприятий радиоэлектронной промышленности показал, что неотъемлемой частью большинства установок и комплексов является регулятор переменного напряжения, который имеет следующие области применения: регулирование нагрева ванн лужения выводов радиоэлементов; регулирование нагрева печей сушки печатных плат; термостатирование объектов, основанного на управлении скоростью вращения вентиляторов; управление микродвигателями, двигателями малой и средней мощности в различного рода автоматах и полуавтоматах и т.д.

В настоящее время в качестве исполнительного органа регулятора переменного напряжения в основном используется фазоуправляемый тиристор. Наряду с достоинствами такого варианта регулятора ему присущ ряд известных недостатков, связанных в основном с ухудшением качества регулируемого напряжения и энергетических показателей самого регулятора при увеличении глубины регулирования.

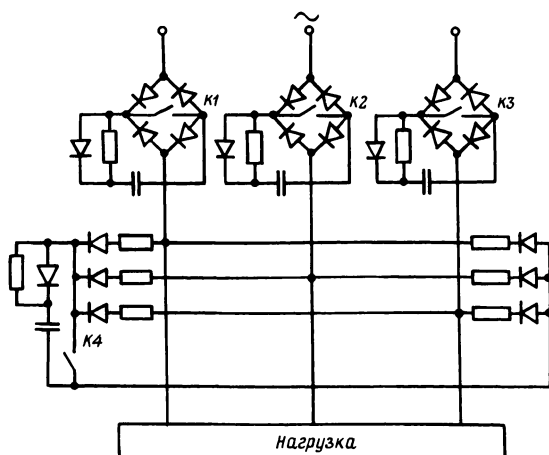


Рис. 1. Схема трехфазного транзисторного коммутатора.

Перспективным направлением в современной технике регулирования переменных токов является повышение частоты коммутации силовых ключей регуляторов. При этом наиболее высокое качество энергии достигается при применении симметричной ШИМ кривых переменного напряжения [1]. Реализовать такой способ регулирования наиболее просто с помощью полностью управляемых ключей — транзисторов. Один из вариантов силовой схемы трехфазного транзисторного коммутатора показан на рис. 1. Частота

коммутации  $f_k = 100 m \text{ Гц}$ , где  $m = 3, 6, 9 \dots$  — число симметрично регулируемых импульсов на полупериоде питающего напряжения. Практически для получения необходимого качества регулируемого напряжения достаточно  $f = 600 \text{ Гц}$  [1]. Схема содержит три однофазных и один трехфазный диодных моста, зашунтированных по постоянному выходу транзисторными ключами К1—К4. Ключи К1, К2, К3 работают в противофазе с ключом К4: первые подключают нагрузку к сети, а последний ее закорачивает. Для устранения сквозных токов, обусловленных наличием времени рассасывания избыточных носителей в базовых переходах закрывающихся транзисторов, применяется задержка на включение вступающих в работу ключей. В данном случае из-за относительно низкой частоты коммутации это практически не оказывает влияния на форму ШИМ (рис. 2). Дополнительную трудность создает отсутствие высоковольтных быстродействующих диодов средней мощности. Поэтому при использовании низкочастотных диодов серии В или ВЛ в плечах трехфазного моста приходится устанавливать дополнительные резисторы (либо дроссели), ограничивающие токи транзисторных ключей во время восстановления запирающих свойств диодов. Соответственно это искажает форму промодулированного напряжения на нагрузки (рис. 2,а). Из осциллограммы видно, что во время пауз в ШИМ на зажимах нагрузки появляется обратный выброс, обусловленный падением напряжения на ограничивающих резисторах. Кривая тока (рис. 2, б) непрерывна и по форме близка к синусоиде. Практический диапазон плавного изменения угла регулирования  $\alpha$  от  $0,05$  до  $0,95 \alpha_{\max}$ , а при достижении граничных углов коммутатор дискретно переключается либо на режим полного напряжения (при  $\alpha > 0,95 \alpha_{\max}$ ) либо на отключение нагрузки (при  $\alpha < 0,95 \alpha_{\max}$ ). Ограничение объясняется наличием защитных цепочек, включенных параллельно каждому транзисторному ключу (рис. 1) с целью снижения коммутационных потерь выключе-

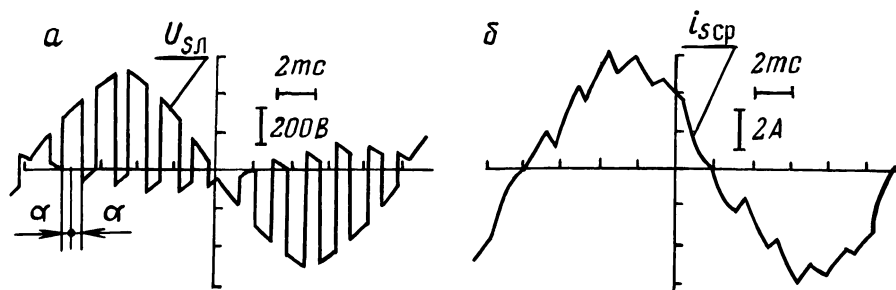


Рис. 2. Осциллограммы напряжения (а) и тока (б) статора асинхронного двигателя при симметричной ШИМ.

ния. Для их эффективной работы емкость цепочки должна успеть разрядиться за время включенного состояния транзистора. Таким образом, граничные углы  $\alpha$  определяются постоянной времени RC цепочки. Рассмотренная схема коммутатора пригодна и для управления нагрузкой постоянного тока, которую необходимо включать на выход трехфазного моста вместо ключа К4. К недостаткам схемы следует отнести большое количество диодов, а также не-

равномерность загрузки транзисторных ключей по мощности (ключ К4 перегружен), другими словами, их неуниверсальность.

Более правильным решением является разработка типовых однофазных ключей, учитывающих специфику регулирования (закорачивание нагрузки на время отключения ее от сети). Схема такого ключа приведена на рис. 3.

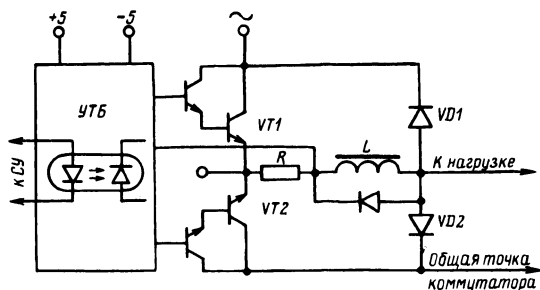


Рис. 3. Схема силового транзисторного ключа.

Силовые транзистор VT1 и диод VD1 служат для подключения нагрузки к сети, а VT2 и VD2 соответственно закорачивают нагрузку во время пауз. Преобразователи напряжения переменного тока относятся к устройствам с постоянно изменяющимся мгновенным значением тока нагрузки, поэтому с целью повышения к.п.д. ключа, последний выполнен по схеме составного транзистора. Для получения широкого диапазона изменения длительности базового тока выходного ключа он питается от усилителя тока базы УТБ с непосредственной связью между каскадами. УТБ построен с использованием дополнительного низковольтного источника ( $U_n + 5В$ ), что позволяет осуществлять активное запирающее свойство силовых транзисторов. Использование на входе УТБ патрона обеспечивает надежную гальваническую развязку системы управления с силовой цепью. Низкоомный резистор R служит в качестве датчика тока для защиты силовых транзисторов от перегрузки. Ток ключа во время восстановления запирающих свойств диодов ограничивается дросселем L. Для устранения сквозных токов пригодны два способа: либо ввести задержку на переключение транзисторов, работающих в противофазе либо использовать избирательное включение транзисторов в зависимости от направления токов в фазах, причем в качестве датчика тока может служить тот же резистор R.

Регуляторы напряжения переменного тока, построенные на основе рассмотренного универсального самозащищенного ключа, отличаются высокой надежностью и относительно небольшими потерями на коммутацию, что позволит успешно использовать их для управления нагрузками различного характера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ильин О.П., Беляев В.П., Головач О.А. Анализ гармонического состава напряжения трехфазной ШИМ переменного тока. — Научные и прикладные проблемы энергетики. — Минск: Вышэйшая школа, 1981, вып. 8, с. 106—111.



## О РАЦИОНАЛЬНОЙ ЗАПИСИ УРАВНЕНИЙ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ОТ ЦИКЛОКОНВЕРТОРА

В теории обобщенных электромеханических преобразователей известны различные формы записи дифференциальных уравнений трехфазной асинхронной машины (АМ), различающиеся в зависимости от принятой системы координат. Установлено, что при тиристорном управлении короткозамкнутым АМ наиболее целесообразна система координат, неподвижная по отношению к статору [1]. При этом количество фазных осей в системе координат может быть различным. В частности, широко распространена система с ортогональными фазными осями —  $\alpha$  и  $\beta$ . В такой системе содержится минимальное число дифференциальных уравнений, описывающих АМ, что обычно экономит время расчета переходных процессов на ЭЦВМ. Однако при цифровом моделировании системы "циклоконвертор с естественной коммутацией — АМ" ("Ц—АМ") использование координат  $\alpha$  и  $\beta$  приводит к необходимости пересчета на каждом временном интервале реального трехфазного напряжения циклоконвертора в напряжение по осям  $\alpha, \beta$ . Получаемые в результате решения токи статора по осям  $\alpha, \beta$  затем необходимо преобразовать в токи статора по осям  $a, b, c$  трехфазной АМ. Последнее позволяет учесть обратную связь от нагрузки на тиристорный преобразователь, которая обычно рассматривается, как действие токов статора на сохранение проводимости соответствующих тиристоров силовой цепи преобразователя. Вместе с тем исследования частотно-управляемого асинхронного электропривода свидетельствуют, что обратная связь по току не исчерпывает действия АМ на преобразователь, в особенности на циклоконвертор с естественной коммутацией. В частности, включение тиристоров не определяется полностью режимом управления, так как зависит и от значения э.д.с. в фазах статора АМ. При этом возможно под действием э.д.с. нарушение заданного порядка коммутации тиристоров, что существенно изменяет выходное напряжение циклоконвертора. Влияние э.д.с. АМ проявляется в наибольшей степени при работе машины с абсолютными скольжениями  $|\beta| \leq \beta_n$  на частотах  $f \geq 0,2 f_n$ .

Поэтому при моделировании системы "Ц—АМ" необходимо корректно организовывать взаимодействие между преобразователем и машиной с учетом как тока, так и э.д.с. статора АМ.

В силу изложенного целесообразно дифференцированные уравнения АМ записать через токи в реальных фазных координатах  $a, b, c$ , выразив в этих уравнениях в явном виде фазные э.д.с. статора. Такая форма записи дифференциальных уравнений позволяет непосредственно получить при решении координаты, воздействующие через силовую цепь на коммутацию тиристоров циклоконвертора.

Для этого, воспользовавшись известными дифференциальными уравнениями АМ в осях  $\alpha-\beta$ , а также соотношениями между переменными в этой системе и переменными в трехфазной системе фазных координат статора

а, b, с, получим при изолированных нейтралях следующую систему дифференциальных уравнений, записанную относительно токов статора и ротора:

$$\begin{aligned} u_{Sq} &= R_S i_{Sq} + L_S \frac{di_{Sq}}{dt} + L_m \frac{di_{Rq}}{dt}; \\ 0 &= R_R i_{Rq} + L_R \frac{di_{Rq}}{dt} + L_m \frac{di_{Sq}}{dt} - e_{bq}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $u_{Sq}$  – фазное мгновенное значение напряжения статора;  $i_{Sq}$ ,  $i_{Rq}$  – фазные мгновенные значения токов статора и ротора;  $L_S$ ,  $L_R$  – полные индуктивности фазы статора и ротора;  $L_m$  – взаимная индуктивность между статором и ротором;  $e_{bq}$  – фазное мгновенное значение э.д.с. вращения АМ,

$$e_{bq} = \frac{\omega_R L_R}{\sqrt{3}} (i_{Rq} + 2 i_{R(q-1)} + K_R (i_{Sq} + 2 i_{S(q-1)})).$$

Здесь  $q$  – индекс координатной оси фазы;  $q = a, b, c$ ;  $(q - 1) = c, a, b$ ;  $\omega_R$  – электрическая скорость ротора;  $K_R$  – коэффициент связи,  $K_R = L_m/L_R$ .

Уравнения (1) можно записать в виде

$$\frac{di_{Sq}}{dt} = \frac{1}{L_S} (u_{Sq} - R_S i_{Sq} - L_m \frac{di_{Rq}}{dt}); \quad (2)$$

$$\frac{di_{Rq}}{dt} = \frac{1}{L_R} (e_{bq} - R_R i_{Rq} - L_m \frac{di_{Sq}}{dt}). \quad (3)$$

Выполним подстановку тождества (2) во второе уравнение, а тождества (3) – в первое уравнение системы (1). После соответствующих преобразований получим

$$\begin{aligned} u_{Sq} &= R_S i_{Sq} + (L_{\sigma S} + K_R L_{\sigma R}) \frac{di_{Sq}}{dt} + e_{Sq}; \\ -K_S u_{Sq} &= R_R i_{Rq} + (L_{\sigma R} + K_S L_{\sigma S}) \frac{di_{Rq}}{dt} - e_{Rq}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $L_{\sigma S}$ ,  $L_{\sigma R}$  – индуктивности от полей рассеяния обмоток статора и ротора;  $K_S$  – коэффициент связи статора;  $K_S = L_m/L_S$ ,  $e_{Sq}$  – мгновенное значение фазной э.д.с. статора,

$$e_{Sq} = K_R e_{bq} - K_R R_R i_{Rq};$$

$e_{Rq}$  – мгновенное значение фазной э.д.с. ротора

$$e_{Rq} = e_{bq} - K_S R_S i_{Sq}.$$

Анализ полученной системы дифференциальных уравнений (4) показывает, что уравнениям цепи статора может быть поставлена в соответствие трехфазная схема замещения статора АМ. Эта схема включает три ветви, соединенные в звезду. Каждая ветвь состоит из последовательно включенных активного сопротивления обмотки фазы статора  $R_S$ , ее эквивалентной индук-

тивности  $L_{S3} = L_{6S} + K_R L_{6R}$  и фазной э.д.с.  $e_{Sq}$ . Наличие такой схемы замещения позволяет производить расчет напряжения в нагрузке системы "Ц-АМ" методами расчета электрических цепей [2]. Кроме упрощения количественного анализа, схема замещения дает наглядное объяснение некоторым явлениям при тиристорном управлении АМ. В частности э. д. с.  $e_{Sq}$  включает в себя не только э.д.с. вращения  $e_{bq}$ , возникающую от действия токов при вращении ротора АМ, но и э.д.с. взаимоиנדукции  $e_{RSq}$ , которая наводится и при неподвижном роторе. Данная схема замещения справедлива как в установившихся, так и в переходных процессах при любой асимметрии и форме питающего напряжения. В установившемся режиме работы и симметрии трехфазных выходных напряжений циклоконвертора уравнения (4) позволяют получить эквивалентную однофазную схему замещения АМ. При определенных допущениях однофазная схема замещения АМ является удобной основой для аналитического исследования системы "Ц-АМ" [3].

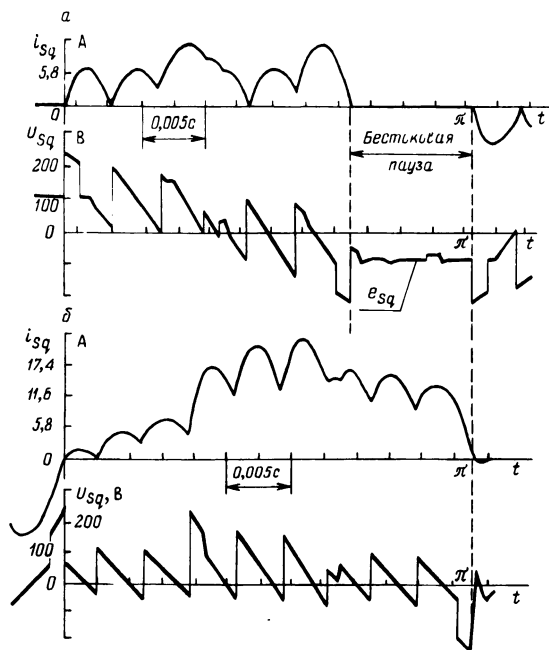


Рис. 1. Осциллограммы кривых фазных токов и напряжений АМ при холостом ходе (а) и коротком замыкании (б).

На рис. 1 приведены осциллограммы кривых фазных токов и напряжений АМ типа А02 41-4, 4 кВт, 1450 об/мин при питании ее напряжением с частотой  $16 \frac{2}{3}$  Гц от трехфазно-трехфазного трехпульсного лучевого циклоконвертора на 18 тиристорах, работающего с постоянным углом управления  $\alpha_1 = 70^\circ$ . Причем, рис. 1, а соответствует режиму холостого хода АМ ( $n_R = 500$  об/мин), а рис. 1, б — режиму короткого замыкания ( $n_R = 0$ ).

Приведенные осциллограммы показывают существенное влияние э.д.с., АМ на выходные напряжения и ток циклоконвертора и служат подтверждением необходимости прямого учета фазной э.д.с. статора АМ.

Поэтому систему уравнений (4), которая адекватно отражает физические процессы в реальной электрической асинхронной машине, управляемой от циклоконвертора, наиболее целесообразно использовать в качестве основы при математическом моделировании комплекса "Ц—АМ".

Таким образом, предложена и обоснована рациональная форма записи дифференциальных уравнений трехфазной асинхронной электрической машины, позволяющая обеспечить моделирование на ЦВМ процессов при частотном управлении асинхронной машиной от тиристорного циклоконвертора с естественной коммутацией.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К о п ы л о в И.П., Щ е д р и н О.П. Расчет на ЦВМ характеристик асинхронных машин. — М.: Энергия, 1973. — 120 с. 2. Ф и р а г о Б.И., С и д о р о в В.Г. Определение напряжения на нагрузке системы "тиристорный циклоконвертор — асинхронный двигатель". — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1982, № 1, с. 33—37. 3. Ф и р а г о Б.И., С и д о р о в В.Г. Анализ квазистационарных электромагнитных процессов в асинхронном двигателе, питаемом от тиристорного циклоконвертора. — *Elektrotechnicky Casopis*, 32, 1981, с. 3, с. 186—200.

УДК 621.317.1

Г.А. БАХАНОВИЧ, инженер (ММИ)

### ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО УГЛА СИНХРОННЫХ МАШИН

Большинство существующих схем измерительных устройств внутреннего угла  $\theta$  синхронных машин выполнены по электромагнитной системе [1—3], обладающей инерционностью, погрешностью в динамических режимах, сложностью настройки и эксплуатации, что затрудняет их применение для быстроходных синхронных электроприводов малой мощности.

Более совершенным является устройство, предложенное в [4], где фиксация оси поля ротора осуществляется с помощью бесконтактной безынерционной фотосистемы. Вместе с тем это устройство является достаточно сложным из-за необходимости дополнительной коммутации и, кроме того, вносит заметное запаздывание, так как измерение выходного напряжения, пропорционального углу  $\theta$ , производится один раз за период напряжения сети.

Предъявляемые к измерительным устройствам угла  $\theta$  требования высокой точности, быстродействия, стабильности измерения как в установившемся, так и в динамическом режимах, простоты и надежности в эксплуатации могут быть в определенной мере обеспечены применением измерительного преобразователя внутреннего угла синхронных машин, принципиальная схема которого показана на рис. 1.

Применение датчика, фиксирующего положение ротора синхронной ма-

шины, состоящего из практически безынерционного элемента-фотодиода, легкого диска с узкими щелями (число которых равно числу полюсов машины и жестко закрепленного на валу), осветителя и полупроводникового усилителя импульсов, обеспечивает более высокую точность измерения по сравнению с датчиками электромагнитной системы, "удержание" угла  $\theta$  в динамических режимах, простоту и надежность в эксплуатации.

Преимуществом рассматриваемого измерительного преобразователя по сравнению с [4] является более простая схема и меньшее запаздывание.

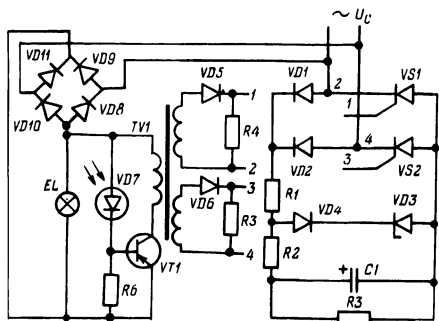


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная измерительного преобразователя.

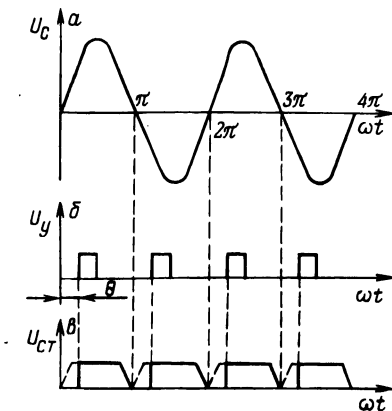


Рис. 2. Временная зависимость напряжения питающей сети  $U_C = f_1(\omega t)$  (а); выходного сигнала датчика положения ротора  $U_Y = f_2(\omega t)$  (б) и выходного напряжения стабилизатора  $U_{CT} = f_3(\omega t)$  (в).

Принцип работы измерительного преобразователя состоит в следующем. Синусоидальное напряжение сети (рис. 2,а) подается на диагональ полупроводящего тиристорного выпрямителя, собранного по однофазной мостовой схеме с использованием двух тиристоров VS1 и VS2 и диодов VD1 и VD2. К управляющим электродам тиристоров VS1 и VS2 подключен выход полупроводникового усилителя импульсов, напряжение на выходе которого имеет форму рис. 2, б. При относительном расположении во времени сигналов  $U_Y$  и  $U_C$ , показанном на рис. 2, а и рис. 2,б, выходное напряжение полупроводящего тиристорного выпрямителя ограничивается стабилизатором напряжения и принимает форму рис. 2,в. При изменении угла рассогласования импульсы с датчика положения ротора, выходным звеном которого является полупроводниковый усилитель импульсов, смещаются по фазе относительно напряжения питающей сети, что приводит к изменению углов зажигания тиристоров VS1 и VS2. Изменение углов зажигания тиристоров VS1 и VS2 приводит к изменению выходного напряжения полупроводящего выпрямителя, стабилизированного напряжения и, следовательно, среднего значения выходного напряжения измерительного преобразователя, которое может быть использовано в системах автоматического регулирования возбуждения по углу  $\theta$ .

Настройка измерительного преобразователя производится при опыте идеального холостого хода синхронной машины поворотом вращающегося диска относительно ротора таким образом, чтобы начало полупериода синусоиды напряжения питающей сети совпадало по фазе с началом управляющих импульсов датчика положения ротора.

### В ы в о д ы

Описанный измерительный преобразователь внутреннего угла синхронных машин прост по конструкции и надежен в эксплуатации.

Применение практически безынерционного датчика, фиксирующего положение ротора относительно поля статора, позволяет получить высокую точность измерения угла  $\theta$ .

Показания измерительного преобразователя стабильны в условиях как установившегося, так и динамического режимов.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. И патенко Н.Р., Боканов Н.В., Космачев Н.У. Устройство для измерения угла устойчивости синхронной машины. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1967, № 11, с. 106—109. 2. Губенко Т.П., Фильц Р.В., Глухивский Л.И. Прибор для измерения угла выбега синхронной машины. — Изв. вузов СССР. Электромеханика, 1970, № 7, с. 813—814. 3. И патенко Н.Р., Боканов Н.В., Космачев Н.У. Тиристорный измеритель угла  $\theta$  синхронных машин. — Электротехника, 1971, № 9, с. 30—32. 4. Пойдо А.И. Устройство для измерения внутреннего угла  $\theta$  синхронной машины: Сб. науч.тр./Моск. энергетич. ин-т. — М.: МЭИ, 1972, вып. 97. — 136 с.

УДК 621.9.014.001.24

Г.И. ГУЛЬКОВ, аспирант (БПИ)

### ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ

Общепринятым критерием оптимизации процессов резания металлов является минимум приведенных затрат. Анализ составляющих приведенных затрат, осуществляемый для продольно-шлифовального станка модели МС510Ф1, показал, что затраты, связанные с расходом шлифовального круга и правящего инструмента, значительно меньше приведенных затрат на эксплуатацию шлифовального станка. Без учета затрат, связанных с расходом шлифовального круга и правящего инструмента, критерий минимума приведенных затрат вырождается в критерий максимума производительности. Он может быть представлен в виде переменной части штучного времени  $t_n$ , зависящей от режима резания:

$$t_n = t_p + \frac{t_{пр} + t_{см}/n}{T} t_p' \quad (1)$$

где  $t_p$  — время шлифования;  $t_{пр}$  — время правки шлифовального круга;  $t_{см}$  — время смены шлифовального круга при полном износе;  $T$  — стойкость шлифовального круга;  $n$  — число правок круга до полного износа.

Выражение (1), как и аналогичные ему имеющиеся в литературе [1], не

учитывает времени реверсирования стола с деталью, что для процесса шлифования не всегда оправдано. Время шлифования определяется

$$t_p = \frac{LBhk}{V_{\partial} S_t S_o} = \frac{L_i}{V_{\partial}}, \quad (2)$$

где  $L$  – длина шлифования;  $B$  – ширина шлифования;  $h$  – припуск на шлифование;  $k$  – коэффициент, учитывающий выхаживание и износ круга (для чернового шлифования  $k = 1$ );  $V_{\partial}$  – скорость движения детали;  $S_t$  – вертикальная подача на глубину шлифования;  $S_o$  – поперечная подача на ширину шлифования;  $i$  – количество необходимых для обработки проходов.

Стойкость шлифовального круга  $T$ , работающего в условиях затупления зерен, неоднозначно зависит от режимов резания. Установлено, что с увеличением скорости резания стойкость увеличивается, а с увеличением любой из подач – уменьшается [2]. Из формулы (2) видно, что с увеличением стойкости круга время  $t_n$  уменьшается. Следовательно, при прочих равных условиях производительность обработки будет выше при большей скорости резания. Считаем, что скорость резания в процессе износа шлифовального круга поддерживается на максимально возможном уровне. В этом случае стойкость круга и производительность обработки не зависят от скорости резания. Стойкость круга при плоском шлифовании периферией круга связана с режимами резания эмпирической зависимостью [3]

$$T = \frac{0,35 \cdot H^2}{(V_{\partial} S_t S_o)^2} K_1 K_2, \quad (3)$$

где  $H$  – высота шлифовального круга;  $K_1, K_2$  – коэффициенты, зависящие от обрабатываемого материала и диаметра круга соответственно. Подставив (2) и (3) в (1), получим

$$t_n = \frac{L_i}{V_{\partial}} \left( 1 + \frac{t_{np} + t_{cm}/n}{0,35 \cdot H^2 K_1 K_2} (V_{\partial} S_t S_o)^2 \right). \quad (4)$$

Область существования целевой функции (4) определяется техническими ограничениями, налагаемыми на режим резания требованиями к детали, станком. Особых требований к точности и чистоте обработки при черновом шлифовании не предъявляется. В этом случае ограничениями являются:

а) мощность привода шлифовального круга

$$P_H \geq P_{рез}, \quad (5)$$

где  $P_H$  – номинальная мощность двигателя;  $P_{рез}$  – мощность резания:

б) максимальные и минимальные значения скоростей подач

$$\begin{aligned} V_{\partial \max} &\geq V_{\partial} \geq V_{\partial \min}; \\ S_{t \max} &\geq S_t > 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Выражения (3) – (6) представляют собой математическую модель процесса плоского шлифования. Основным возмущающим воздействием для процесса шлифования является изменение припуска  $h$ , что характеризуется

изменением вертикальной подачи на глубину  $S_t$ . В качестве управляющего воздействия принимаем скорость движения детали  $V_{\partial}$ , так как в случае шлифования узких направляющих, когда  $H > B$ , регулирование  $S_o$  вообще невозможно.

В работе [1] показано, что производительность при плоском шлифовании является экстремальной функцией скорости движения стола  $V_{\partial}$ . Рассматривая  $S_o$  и  $S_t$  как параметры, возьмем первую производную от выражения (4) по скорости  $V_{\partial}$  и приравняем ее нулю. Получим уравнение для определения значений  $V_{\partial} = V_{\partial \text{ опт}}$ , при которых время  $t_n$  минимально, а производительность шлифования имеет максимум

$$V_{\partial \text{ опт}} = \frac{0,6 \cdot H}{S_t S_o} \sqrt{\frac{K_1 K_2}{t_{\text{пр}} + t_{\text{см}}/n}} \quad (7)$$

В данных условиях шлифования величины, входящие в правую часть выражения (7), за исключением  $S_t$ , неизменны. Перепишем выражение (7) следующим образом:

$$V_{\partial \text{ опт}} \cdot S_t \cdot S_o = 0,6 \cdot H \sqrt{\frac{K_1 K_2}{t_{\text{пр}} + t_{\text{см}}/n}} = C \quad (8)$$

При изменении условий шлифования коэффициент  $C$  изменяется. Анализ показывает, что наибольшее влияние на изменение  $C$  оказывает изменение высоты круга  $H$ , так как  $K_1, K_2$  имеют значения близкие к единице [3],  $(t_{\text{пр}} + t_{\text{см}}/n)$  для данного станка в среднем постоянно.

Значения  $V_{\partial \text{ опт}}$ , согласно (5), (6), ограничены номинальной мощностью привода шлифовального круга  $P_H$  и максимальными и минимальными значениями  $V_{\partial}$  и  $S_t$ . Известно [4], что мощность резания при плоском шлифовании периферией круга

$$P_{\text{рез}} = 1,77 (V_{\partial} \cdot S_t \cdot S_o)^{0,7} K_3 K_4 K_5, \quad (9)$$

где  $K_3, K_4, K_5$  — коэффициенты, зависящие от твердости и высоты круга, обрабатываемого материала, коэффициента заполнения стола соответственно.

Сопоставив выражения (8) и (9), можно утверждать, что (8) будет выполняться при сохранении мощности резания постоянной, т.е.  $P_{\text{рез}} = \text{const}$ . Подставив выражение (8) в (9) и учитывая (5), определим граничное значение коэффициента  $C$  по условиям ограничения мощности резания номинальным значением мощности двигателя

$$C_{\text{гр}} = 0,44 \left( \frac{P_H}{K_3 K_4 K_5} \right)^{1,43} \quad (10)$$

Как следует из (7) и (10), в условиях шлифования при  $C \geq C_{\text{гр}}$  оптимальное управление  $V_{\partial \text{ опт}}$  располагается на линии

$$V_{\partial} = \frac{C_{\text{гр}}}{S_t S_o} \quad (11)$$



в диапазоне изменения  $S_t$ , определяемом неравенством

$$S_{t1} \leq S_t \leq S_{t2}.$$

Подставив в (11) значения  $V_{\partial \max}$  и  $V_{\partial \min}$ , определим значения  $S_{t1}$  и  $S_{t2}$ :

$$S_{t1} = \frac{C_{гр}}{V_{\partial \max} S_0}; \quad S_{t2} = \frac{C_{гр}}{V_{\partial \min} S_0}. \quad (12)$$

Как следует из (12), диапазон изменения  $S_t$ , при котором оптимальное управление располагается на линии  $V_{\partial} = V_{\partial \max}$  определяется неравенством

$$0 < S_t \leq S_{t1}.$$

В условиях шлифования при  $C < C_{гр}$  оптимальное управление определяется по выражениям (11), (12), подставив в них  $C$  вместо  $C_{гр}$ .

На рис. 1 представлена область допустимых значений  $V_{\partial \text{опт}} = f(S_t)$ . Кривая 1 представляет собой линию ограничения по  $V_{\partial \max}$ ; кривая 2 — линию ограничения по  $P_{рез} = P_n$ ; кривая 3 — по  $V_{\partial \min}$ . Расчет проведен для следующих условий: шлифование чугуна шлифовальным кругом диаметром 600 мм ( $K_1 = 1,1$ ;  $K_2 = 1,0$ ;  $K_3 = 1,12$ ;  $K_4 = 0,9$ ;  $K_5 = 1$  [4]), высотой 100 мм, при поперечной подаче  $S_0 = 70$  мм/ход ( $t_{пр} + t_{см}/n$ ) = 2 мин,  $P_n = 15$  кВт,  $V_{\partial \max} = 50$  м/мин,  $V_{\partial \min} = 1$  м/мин. Для таких условий  $C = 44,5$ ;  $C_{гр} = 20,9$ ; т.е.  $C > C_{гр}$ . В этом случае целевая функция (4) достигает экстремума на линиях, ограничивающих допустимую область изменения  $V_{\partial \text{опт}}$ . Изменение поперечной подачи  $S_0$ , которая для чернового шлифования составляет (0,4—0,7)  $H$ , вызывает деформацию области допустимых значений  $V_{\partial \text{опт}}$ . На этом же рис. 1 в виде линии 4 показано ограничение по величине максимально допустимой мощности резания при  $S_0 = 40$  мм/ход, в виде линий 5, 6 — кривые  $V_{\partial \text{опт}} = f(S_t)$  без учета ограничений при  $S_0 = 40$  мм/ход,  $S_0 = 70$  мм/ход соответственно.

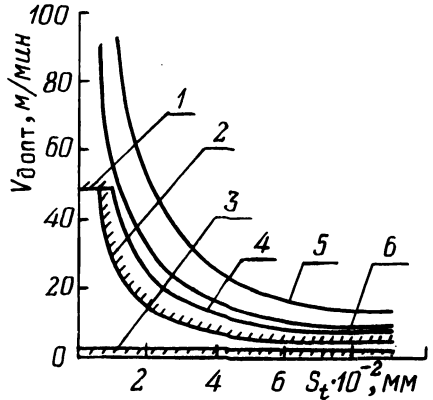


Рис. 1. Область допустимых значений  $V_{\partial \text{опт}}$

Для более точного определения оптимального управления введем в (4) время реверсирования стола с деталью  $t_1$ :

$$t_n = \frac{Li}{V_{\partial}} \left( 1 + \frac{t_{пр} + t_{см}/n}{0,35 \cdot H^2 K_1 K_2} (V_{\partial} \cdot S_t \cdot S_0)^2 \right) + t_1. \quad (13)$$

Время  $t_1$  может быть определено из условия сохранения постоянства уско-

рения на участке торможения и разгона стола с деталью, что является одним из требований к электроприводу стола:

$$t_1 = 2 \cdot \frac{V_{\partial}}{3600 \cdot a} = \frac{V_{\partial}}{1800 \cdot a}, \text{ мин.} \quad (14)$$

где  $a$  — ускорение стола с деталью на участке торможения и разгона,  $\text{м/с}^2$ .

Подставив (14) в (13), взяв от него производную по  $V_{\partial}$  и приравняв ее к нулю, получим аналитическое выражение для определения значений  $V_{\partial} = V_{\partial \text{ опт1}}$ , при которых целевая функция (13) принимает минимальное значение:

$$V_{\partial \text{ опт1}} = \sqrt{\frac{L}{L(t_{\text{пр}} + t_{\text{см}}/n)(S_0 S_t)^2 + 5,6 \cdot 10^{-4}/a}} \cdot 0,35 \cdot \text{Н}^2 K_1 K_2 \quad (15)$$

Из выражения (7), определяющего оптимальную скорость движения детали без учета времени реверсирования стола, видно, что уменьшение глубины резания  $S_t$  при прочих равных условиях и неучете технических ограничений ведет к неограниченному росту значения  $V_{\partial \text{ опт}}$ . В отличие от этого анализ выражения (15) показывает, что при уменьшении длины шлифуемой поверхности  $L$  и подачи на глубину  $S_t$  первое слагаемое знаменателя стремится к

нулю. Следовательно, максимальное значение  $V_{\partial \text{ опт1}}$  ограничено длиной шлифуемой поверхности  $L$  и ускорением при реверсировании стола с деталью  $a$

$$V_{\partial \text{ опт1 макс}} = \sqrt{1800 La} \dots$$

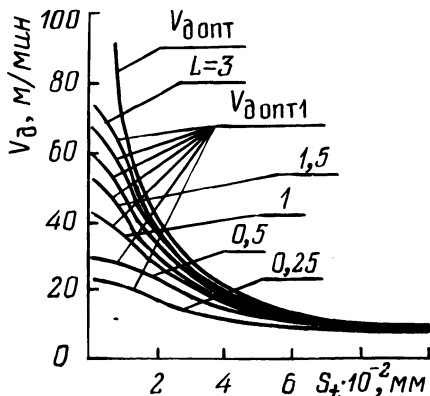


Рис. 2. Зависимости  $v_{\partial \text{ опт}} = f(S_t)$ ;  $v_{\partial \text{ опт1}} = f(S_t)$  при различных значениях  $L$ .

На рис. 2 представлены результаты расчета оптимальных скоростей движения стола по выражению (7) и (15) для условий, указанных в данной статье. Как видно из графиков, значения оптимальных скоростей, рассчитанных без учета и с учетом времени реверсирования стола с деталью, отличаются друг от друга, причем  $V_{\partial \text{ опт}} > V_{\partial \text{ опт1}}$ . Практически совпадение ре-

зультатов расчета  $V_{\partial \text{ опт}}$  и  $V_{\partial \text{ опт1}}$  начинается со значения  $S_t = 0,1 \text{ мм}$ , при котором отличие  $V_{\partial \text{ опт}}$  от  $V_{\partial \text{ опт1}}$  не превышает 6% при  $L = 0,25 \text{ м}$ . Область допустимых значений  $V_{\partial \text{ опт1}}$  определится по соотношениям (11) и (12). Рекомендуемые значения вертикальной подачи на глубину  $S_t$  для обработки направляющих из чугуна составляют 0,025–0,06 мм, для обработки стальных деталей — 0,015–0,04 мм. Из рис. 2 видно, что в диапазоне возможного изме-

нения припуска  $h$  и параметра  $S_t$  от значения близкого к нулю до максимального рекомендуемого значения  $V_{допт}$  и  $V_{допт1}$  значительно отличаются друг от друга.

Следовательно, для определения оптимального управления процессом чернового плоского шлифования на продольно-шлифовальном станке необходимо использовать выражение (15), учитывающее время реверсирования стола с деталью. Использование выражения (7) оправдано в случае, когда заведомо известно, что подача на глубину  $S_t$  в процессе шлифования с изменяющимся по длине детали припуском не становится меньше 0,1 мм.

Изложенная методика определения оптимальных сочетаний  $V_d$  и  $S_t$  для плоского шлифования может быть использована также для тяжелых круглошлифовальных станков при шлифовании периферией круга методом продольной подачи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шапарев Н.К., Водичев В.А. К вопросу построения поисковой системы управления электроприводом шлифовального станка. — В сб.: Электромашиностроение и электрооборудование. Киев: Техника, 1979, № 29, с. 19–24.
2. Филимонов Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов. — Л.: Машиностроение, 1979. — 136 с.
3. Общемашиностроительные нормативы режимов резания и времени для технического нормирования работ на шлифовальных станках. Серийное производство. — М.: Машгиз, 1962. — 200 с.
4. Справочник нормировщика-машиностроителя. — М.: Машгиз, 1961. — 892 с.

УДК 541.126.662.62.001.5

В.С. СЕВЕРЯНИН, канд.техн.наук,  
Е.М. ДЕРЕЩУК, инженер (БИСИ)

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ УСТРОЙСТВАМИ  
ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ**

В промышленной энергетике используется много устройств, в которых теплопроводность нагреваемого материала ограничивает их производительность. Например, процесс термического разжижения битумов имеет предел по производительности, обусловленный теплопроводностью этого материала, несмотря на высокие значения коэффициентов теплоотдачи от греющей поверхности к битуму.

Созданная промышленная битумоплавильная установка с устройствами пульсирующего горения [1] имеет производительность в несколько раз выше по сравнению с обычными битумоплавильными установками.

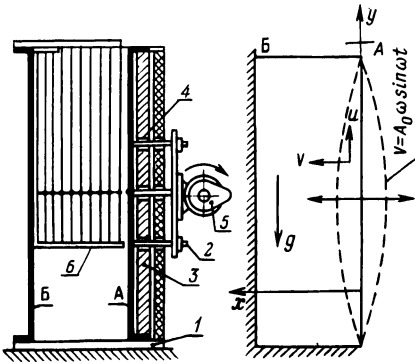


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Повышенную производительность нельзя объяснить только высокими значениями коэффициента теплоотдачи от горячих пульсирующих топочных газов к стенке теплообменника. Для исследования процесса нагрева битума была изготовлена экспериментальная установка, имитирующая разогрев битума с вибрациями, характерными для устройства пульси-

рующего горения. На рис. 1 в поперечном разрезе изображена экспериментальная установка. Она имеет станину 1, к которой жестко крепится необогреваемая пластина Б. На расстоянии 0,04 м от нее с помощью четырех направляющих болтов 2 в опорном кронштейне 3 на втулках 4 удерживается подвижная греющая пластина А размерами 0,5х0,5 м. Для возбуждения колебаний к пластине А крепится механический вибратор с дебалансами 5. Пластина А колеблется в направлении, перпендикулярном ее плоскости, со скоростью

$$V = A_0 \omega \sin \omega t,$$

где  $A_0$  — амплитуда смещения;  $\omega$  — угловая частота.

Боковые зазоры и днище между пластинами А и Б закрыты стеклотканью, пропитанной специальным термостойким составом. По контуру эластичных ограждающих стенок установлены компенсирующие электронагреватели.

ли. Пластина А нагревалась электронагревателями (на рис. 1 не показаны) мощностью 4 кВт. В зазоре между пластинами А и Б установлена перемещаемая специальная рамка 6 с термопарами. В пластины также зачеканены термопары. Вибрации замерялись вибрографом в центре пластины А. Показания термопар записывались на диаграммной ленте автоматическим 12-точечным потенциометром КСП-4.

Порядок опыта был следующий. Предварительно емкость между пластинами заполнялась горячим битумом. После его остывания готовились механические и электрические схемы установок на заданные параметры. Амплитуда смещения  $A_0$  в опытах изменялась в пределах (0,35–0,85) мм путем смены дебалансов вибратора, а частота в пределах (30–96) Гц – изменением скорости вращения вала вибратора. Диапазон этих параметров соответствовал работе устройств пульсирующего горения, которые давали такие же вибрации стенок разжижителей битума. Затем одновременно включались электронагреватели и вибратор (для опытов с вибрациями) и регистрирующие приборы. Нагреватели выходили на стационарный режим за 15–30 с. Опыт прекращался при визуальной фиксации полного разогрева битума в верхней части ванны, когда поверхностный слой битума начинал фонтанировать. При этом отмечено, что длительность опыта с вибрациями была в 1,5–2 раза меньше, чем без вибраций.

На рис. 2 показано изменение температуры битума в разных точках перпендикулярно средней части пластины при  $A_0 = 0,5$  мм, частота 40 Гц. Номера графиков без штрихов – нагрев с вибрациями; со штрихами – без вибраций. Чтобы не усложнять картину, нанесены только некоторые температурные кривые: 1 – точка у поверхности пластины (А); 5 – на расстоянии 7 мм от нее; 9 – на расстоянии 27 мм; 11–17 мм.

Все опытные данные идентичны друг другу. Заметно особое влияние пульсаций на внутренние части объема битума. Важно отметить, что интенсифицируется теплообмен не столько для жидкой фазы битума, сколько в еще неразжиженном битуме. Из анализа температурных кривых следует, что вибрация оказывает меньшее влияние на температурный режим для слоя, прилегающего к обогреваемой стенке, чем для дальних слоев; для слоя возле неподвижной холодной стенки Б воздействие вибраций снова уменьшается.

В рассматриваемом явлении, вероятно, вибрации ведут к росту коэффициента температуропроводности

$$a = \lambda / \rho c,$$

к изменению реологических свойств битума как неньютоновской жидкости,

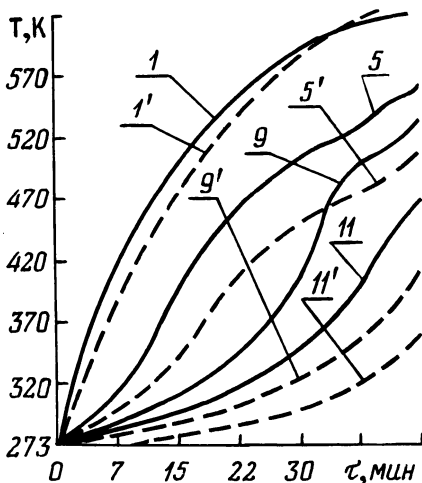


Рис. 2. Изменение температуры в массиве битума.

к внутренним механическим воздействиям жидкой фазы на твердую (внутренняя эрозия благодаря наличию составляющих  $V$  и  $U$ , вихревых перемещений и т.п.), что деформирует нестационарное температурное поле

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right).$$

При вибрациях темп роста температуры  $\partial T / \partial \tau$  в некоторых точках массива битума в несколько раз превышает эту скорость для температурного поля без вибраций. Это, безусловно, означает и заметный рост второй производной температуры по расстоянию. Объяснение этому следует искать в термодиффузионных особенностях рассматриваемого процесса. Анализ нестационарного температурного поля с вибрационным воздействием является предметом отдельного исследования.

Возможен прямой переход энергии колебательного перемещения в теплоту, однако в данном случае этот фактор пренебрежим, так как: а) энергия колебаний (двигатель дебаланса) на порядок меньше энергии подводимого потока; б) эффект вибрации количественно различен по объему, при прямом переходе воздействие было бы равномерным; в) включение только одного вибратора не приводило к ощутимым изменениям температуры в битуме.

В отечественной литературе [2] известны только семь работ, в которых изучались процессы нагрева битумов. И только в одной работе В.Д. Портнягиным [3] изучались процессы нагрева битума с использованием виброподогревателей в битумоплавильных котлах.

Представленные графики изменения температуры нагреваемого битума во времени и в объеме с вибрациями стенок и без вибраций получены впервые; имеющиеся литературные данные не дают нестационарных температурных полей в разогреваемой массе битума при воздействии колебаний. Полученные экспериментальные данные четко фиксируют усиление теплопроводности при наложении на теплообменные системы вибраций, характерных при работе устройств пульсирующего горения. Этим, в частности, объясняется высокая производительность термических разжижителей битума с пульсирующим горением.

Исследование показало перспективность использования устройств пульсирующего горения в технологических процессах, где определяющим является процесс теплопроводности (нагрев различного назначения, плавление, термическая дегазация и т.д.).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Северянин В.С., Дерещук Е.М., Врублевский Э.В. Термический разжижитель битума с пульсирующим горением. Экспресс-информация НИИТЭЖИМ. — М., 1978, № 5, с. 4—6.
2. Соловьев Б.Н. Исследование послыоного разогрева битума, применяемого в дорожных одеждах. — Дис. ... канд. техн. наук. — М., 1978. — 150 с.
3. Портнягин В.Д., Михайлов Н.В. К вопросу о влиянии вибрирования подогревателя на конвективный теплообмен и реологические свойства битумов. — Физико-химическая механика дисперсных структур. — М.: Наука, 1966, с. 126—131.

В.И. ЛИТВИНЕЦ, ст.науч.сотр.,  
В.Б. РУБАХИН, канд.техн.наук,  
В.И. НАЗАРОВ, мл.научн. сотр. (БПИ)

## ОЦЕНКА ВРЕМЕННОЙ ПОГРЕШНОСТИ АППРОКСИМАЦИИ КРИВЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫМ МЕТОДОМ МОМЕНТОВ

Множество технологических объектов автоматизации в энергетике, машиностроении и других отраслях обладают динамическими свойствами, которые могут быть представлены в моделях как объекты второго и более высоких порядков, характеризующиеся запаздыванием различного вида. При их описании используются известные методы аппроксимации [1, 2] кривых разгона с допустимой точностью, что позволяет выполнить расчет настройки автоматических систем регулирования (АСР) на заданную степень устойчивости. Однако реализация расчетных параметров при наладке систем часто требует значительных поправок, объясняемых в большинстве случаев некорректно выполненными экспериментами при определении динамических характеристик объекта. Возможной причиной считают также несистематические флуктуации неконтролируемых переменных, взаимосвязь которых с основными параметрами обуславливает нежелательные изменения качества регулирования.

Автоматизация объектов с широкой взаимозависимостью параметров требует учета различных возмущающих факторов. При этом АСР, проектируемые для обеспечения высокой точности регулирования, отличаются наличием сложных связей, использованием производных контролируемых параметров. Для общего случая целесообразно произвести оценку временной погрешности аппроксимации, позволяющую выполнить анализ работы системы, а также качество работы ее элементов в различных стадиях переходного процесса. Для определенной группы объектов с запаздыванием максимальная величина временной погрешности определена [3] в зависимости от параметров передаточной функции известного порядка. Представляет интерес зависимость временной погрешности от допущений аппроксимации кривых разгона тех параметров, производные которых используются в сложных АСР. На рис. 1 приведены кривые разгона экспериментальной  $h(t)$  и аппроксимирующей  $g(t)$  функций в одном из часто встречающихся вариантов, а ниже – соответствующая им кривая временной погрешности  $\delta_t$ .

Следует отметить, что различия экспериментальных кривых и реакции модели чаще всего оцениваются по суммарному квадратичному критерию

$$I = \int_0^T \epsilon^2(t) dt,$$

где  $\epsilon$  – ошибка аппроксимации (по ординате);  $t$  – время.

Временная погрешность вычисляется для момента  $t$  при некотором значении  $h_0$  ординаты экспериментальной  $h(t)$  и аппроксимирующей  $g(t)$  функцией

$$\delta_t = \frac{t_h - t_g}{t} = \frac{\Delta t}{t}. \quad (1)$$

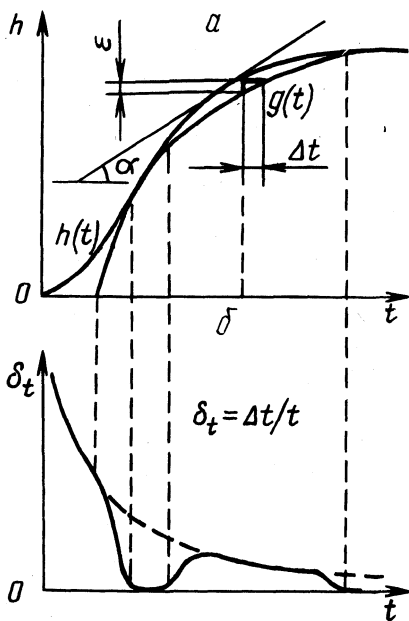


Рис. 1. Экспериментальная  $h(t)$  и аппроксимирующая  $g(t)$  кривые разгона (а) и кривая временной погрешности  $\delta_t$  аппроксимации (б).

Учитывая, что обе ошибки связаны между собой соотношением

$$\operatorname{tg} a = \frac{\omega}{\Delta t} \approx h'(t), \quad (2)$$

где  $a$  — угол наклона касательной (или хорды интервала) в каждой точке сравнения кривых (рис. 1), можно определить зоны и величину нежелательного увеличения временной погрешности производной контролируемого параметра. Вычисление относительного зрения последней производим в начальный период протекания переходного процесса, так как именно здесь относительная величина временной погрешности достигает максиму-

ма и, сознательно допуская ошибку при аппроксимации, мы заранее не используем полезный сигнал производной, закладываем соответственно погрешность в расчет параметров настройки и не получаем желаемого качества регулирования.

Используя уравнения (1) и (2), определим временную погрешность через величину ошибки  $\epsilon$  и значение производной параметра  $h'(t)$ :

$$\delta_t = \frac{\epsilon}{h'(t) t} = \frac{h(t) - g(t)}{h'(t) t}$$

Интегральный критерий от временной погрешности аппроксимации

$$I_t = \int_0^T \delta_t dt \quad (3)$$

представляет собой комплексную величину, отражающую основные соотношения характерных значений исходной и полученной кривых, включая скорость изменения контролируемого параметра, что особенно важно в начальный момент переходного процесса.

Представляя аппроксимирующую функцию в виде суммы ряда ортонормированных функций [4]

$$g(t) = \sum_{i=0}^{\infty} c_i \varphi_i(t), \quad (4)$$

где  $c_i$  — ортогональная спектральная характеристика сигнала;  $\{\varphi_i(t)\}$  — система ортонормированных функций, выполним ряд преобразований, позво-



ляющих упростить критерий (3) до аналитически удобной формы, пригодной для использования в расчетах на ЭВМ. Так как функция  $g(t)$  соответственно выражению (4) определена на интервале  $[0, \infty]$

$$I_t = \int_0^{\infty} \frac{\epsilon}{h'(t)t} dt = \int_0^{\infty} \frac{h(t)}{h'(t)t} dt - \int_0^{\infty} \frac{\sum_{i=0}^{\infty} c_i \varphi_i(t)}{h'(t)t} dt.$$

Полагая  $[1/h'(t)t] = f(t)$ , находим ортогональную спектральную характеристику  $\{\xi_i\}$  функции  $f(t)$  относительно того же базиса ортонормированных функций  $\{\varphi_i(t)\}$ :

$$\xi_i = \int_0^{\infty} \frac{\varphi_i(t)}{h'(t)t} dt = \int_0^{\infty} f(t) \varphi_i(t) \omega(t) dt.$$

При этом следует считать, что функция  $\varphi_i(t)$  ортогональна на интервале  $[0, \infty]$  с весом  $\omega(t) = 1$ . Добиваясь наиболее полного совпадения исходной и аппроксимирующей кривых для конечных пределов интегрирования получаем соотношение

$$I_t = \int_0^T h(t) f(t) dt - \sum_{i=1}^n c_i \xi_i = > 0, \quad (5)$$

позволяющее использовать его в качестве критерия аппроксимации с использованием ЭВМ. Алгоритм расчета аппроксимирующих функций включает следующие этапы:

— выполнение численного дифференцирования заданной кривой  $h(t)$  и определение функции  $f(t)$ ;

вычисление интеграла  $\int_0^T h(t) f(t) dt$  на принятом интервале;

— определение значений моментов функций  $h(t)$  и  $f(t)$  относительно принятого базиса  $\{\varphi_i(t)\}$  как интервала

$$\mu_k = \int_0^T h(t) e^{-kt} dt \quad \text{и} \quad \mu_k = \int_0^T f(t) e^{-kt} dt,$$

где масштабный коэффициент  $k$  определяется как

$$k = \frac{\ln y}{x}.$$

Здесь  $x = bt_k$  и  $y = ah_k$ , где  $h_k$  и  $t_k$  — координаты кривой разгона  $h(t)$  в момент наступления установившегося режима;  $a$  и  $b$  — постоянные коэффициенты, зависящие от формы кривой разгона.

Задавшись определенным видом ортонормированных функций (например, полином Лежандра), рассчитываем значения коэффициентов  $c_i$  и  $\xi_i$ ;

— по критерию (5) определяем точность аппроксимации.

Таким образом, сильная зависимость функционала (5) от производной исходной кривой разгона нормирует приближение аппроксимирующей функции к заданной без пересечений последней и повышение порядка искомой

функции производится до требуемой точности. Следует отметить, что использование предлагаемого критерия с ортогональной системой экспоненциальных функций позволяет удовлетворительно выполнить аппроксимацию кривых разгона любого вида (S-образных, импульсных и др.) до 3—4-го порядка.

### В ы в о д ы

Использование временной погрешности в оценке точности аппроксимации, определенной как функция ординатной ошибки, времени интегрирования и производной заданной кривой, снижает объем вычислительных операций, обеспечивает высокую точность и сходимость исходной аппроксимирующей функции. Применение полученного критерия свободно от ограничений по характеру кривых разгона, а по качеству превосходит интегральный квадратичный критерий ошибки в области малых времен. Предлагаемый критерий не исключает применение его модификаций в частотной области, а также — во временной с различными ортогональными функциями.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Г у р е ц к и й Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. Пер. с польск. — М.: Машиностроение, 1974. — 328 с. 2. Б а л а к и р е в В.С., Д у д н и к о в Е.Г., Ц и р л и н А.М. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. — М.: Энергия, 1967. — 232 с. 3. И ц х о к и Я.С. Приближенный метод анализа переходных процессов в сложных линейных цепях. — М.: Советское радио, 1969. — 176 с. 4. С о л о д о в н и к о в В.В., Д м и т р и е в А.И., Е г у л о в Н.Д. Ортогональный метод анализа и синтеза линейных систем автоматического управления на основе понятия моментов. — В сб.: Автоматическое управление и вычислительная техника. М.: Машиностроение, 1968, вып. 8, с. 30—86.

УДК 621.1.016

**В.К. СУДИЛОВСКИЙ**, канд. техн. наук,  
**Ю.В. МУЛЕВ**, инженер,  
**В.В. КРАВЕЦ**, инженер,  
**В.В. БОБРОВ**, студент (БПИ)

## **К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНТАЛЬПИЙ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА ПО ЛИНИИ НАСЫЩЕНИЯ**

Зачастую при проведении экспериментальных работ и эксплуатационных испытаний теплотехнического оборудования и дальнейшем осуществлении теплотехнических расчетов определяются и используются величины энтальпий воды и водяного пара по линии насыщения. Так как на линии насыщения температура и давление пара связаны однозначно, то определение энтальпий воды и водяного пара можно осуществлять по любому из этих параметров. Однако как экспериментатору, так и эксплуатационнику важно при этом достичь оптимальной степени точности, что приводит к необходимости выбора измеряемого параметра, типа измерительного прибора и его класса точности. До сих пор решение такого вопроса осуществляется интуитивно, так как на него отсутствует обоснованный ответ.

С целью уточнения данного вопроса авторами проведен анализ погрешностей определения энтальпий, для чего были рассчитаны частные производные воды и водяного пара на линии насыщения по давлению и температуре.

Расчет производных осуществлялся на ЭВМ по уравнениям, разработанным физической лабораторией ВТИ [1], обладающих в настоящее время лучшими характеристиками для машинной реализации и наиболее высокой точностью. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

На рис. 1, 2 изображены полученные зависимости частных производных по давлению и температуре энтальпий воды  $(\frac{\partial h^I}{\partial P})_T$ ,  $(\frac{\partial h^I}{\partial T})_P$  и водяного пара  $(\frac{\partial h^{II}}{\partial P})_T$ ,  $(\frac{\partial h^{II}}{\partial T})_P$  на линии насыщения.

Данные зависимости позволяют рассчитывать погрешности определения энтальпий воды и водяного пара и обоснованно осуществлять в каждом конкретном случае выбор методик измерений, измеряемых параметров, необходимых приборов.

В качестве примера в табл. 2 приведены результаты расчета абсолютных погрешностей определения энтальпий воды при измерении давления  $\Delta h^I_P$  и при измерении температуры  $\Delta h^I_T$  и соответственно водяного пара  $\Delta h^I_P$ ,  $\Delta h^I_T$ . Для расчета принято, что измерение температур осуществляется термо-

Т а б л и ц а 1. Частные производные энтальпий воды и водяного пара на линии насыщения

$P, 2$ кгс/см <sup>2</sup>	$P,$ МПа	$T_s,$ К	$(\frac{\partial h^I}{\partial P})_T,$ кДж/кг·МПа	$(\frac{\partial h^I}{\partial T})_P,$ кДж/кг·К	$(\frac{\partial h^{II}}{\partial P})_T,$ кДж/кг·МПа	$(\frac{\partial h^{II}}{\partial T})_P,$ кДж/кг·К
10,0	0,98	452,19	172,047	4,408	29,202	0,884
20,0	1,96	484,55	124,802	4,584	13,254	0,402
30,0	2,94	505,92	90,641	4,722	1,667	0,038
40,0	3,92	522,33	74,052	4,865	- 4,104	-0,302
50,0	4,90	535,84	64,047	5,015	- 7,876	-0,641
60,0	5,88	547,42	57,335	5,170	-10,646	-0,976
70,0	6,86	557,62	52,546	5,338	-12,826	-1,320
80,0	7,85	566,76	48,955	5,506	-14,665	-1,663
90,0	8,83	575,07	46,175	5,682	-16,289	-2,015
100,0	9,81	582,70	43,995	5,962	-17,701	-2,372
110,0	10,79	589,78	42,199	6,050	-19,026	-2,736
120,0	11,77	596,39	40,746	6,239	-20,229	-3,100
130,0	12,75	602,60	39,548	6,436	-21,292	-3,473
140,0	13,73	608,46	38,565	6,633	-22,318	-3,850
150,0	14,71	614,00	37,710	6,838	-23,344	-4,232
160,0	15,69	619,28	37,026	7,043	-24,285	-4,626
170,0	16,67	624,31	36,385	7,248	-25,140	-5,011
180,0	17,65	629,12	35,914	7,467	-25,952	-5,405
190,0	18,63	633,74	35,487	7,684	-26,807	-5,812
200,0	19,61	638,18	35,102	7,902	-27,577	-6,218
210,0	20,59	642,45	34,759	8,124	-28,347	-6,624
220,0	21,57	646,57	34,503	8,346	-29,031	-7,035

метром со шкалой 0–400 °С и классом точности 0,5, а измерение давлений – манометром со шкалой 0–2,50 МПа и классом точности 1,0, часто применяемыми для проведения наладочных испытаний на котлах докритического давления.

Из приведенного расчета можно сделать вывод, что для определения энтальпий воды и водяного пара на линии насыщения в данном случае до дав-

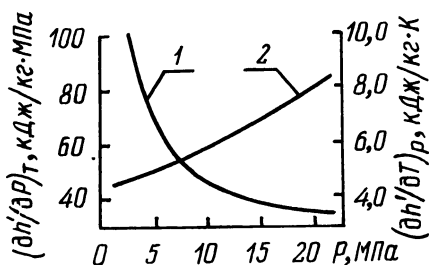


Рис. 1. Частные производные по давлению и температуре энтальпий воды на линии насыщения: 1 –  $(\frac{\partial h'}{\partial P})_T$ ; 2 –  $(\frac{\partial h'}{\partial T})_P$ .

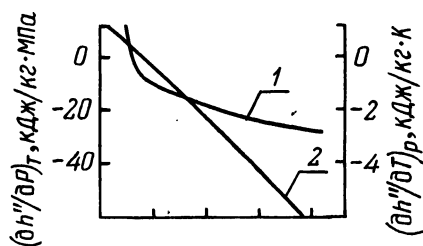


Рис. 2. Частные производные по давлению и температуре энтальпий водяного пара на линии насыщения: 1 –  $(\frac{\partial h''}{\partial P})_T$ ; 2 –  $(\frac{\partial h''}{\partial T})_P$ .

Т а б л и ц а 2. Абсолютные погрешности определения энтальпий воды и водяного пара

$P$ , кгс/см <sup>2</sup>	$P$ , МПа	$T_s$ , К	$\Delta h_p^I$ , кДж/кг	$\Delta h_T^I$ , кДж/кг	$\Delta h_p^{II}$ , кДж/кг	$\Delta h_T^{II}$ , кДж/кг
10,0	0,98	452,19	42,151	8,816	7,156	1,768
20,0	1,96	484,55	30,578	9,168	3,247	0,804
30,0	2,94	504,92	22,207	9,444	0,410	0,075
40,0	3,92	522,33	18,143	9,729	1,005	0,603
50,0	4,90	535,84	15,691	10,031	1,927	1,282
60,0	5,88	547,42	14,049	10,341	2,610	1,952
70,0	6,86	557,62	12,876	10,676	3,142	2,639
80,0	7,85	566,76	11,996	11,011	3,595	3,327
90,0	8,83	575,07	11,313	11,363	3,999	4,031
100,0	9,81	582,70	10,781	11,724	4,336	4,743
110,0	10,79	589,78	10,341	12,101	4,663	5,472
120,0	11,77	596,39	9,985	12,478	4,956	6,201
130,0	12,75	602,60	9,691	12,872	5,216	6,947
140,0	13,73	608,46	9,448	13,266	5,468	7,701
150,0	14,71	614,00	9,239	13,676	5,719	8,463
160,0	15,69	619,28	9,071	14,087	5,949	9,251
170,0	16,67	624,31	8,979	14,497	6,159	10,022
180,0	17,65	629,12	8,799	14,765	6,360	10,810
190,0	18,63	633,74	8,694	15,369	6,570	11,623
200,0	19,61	638,18	8,602	15,805	6,758	12,436
210,0	20,59	642,45	8,518	16,249	6,947	13,248
220,0	21,57	646,57	8,455	16,693	7,114	14,070

лений в 0,9 МПа следует использовать показания термометра, а при давлениях свыше 0,9 МПа наиболее точные результаты измерения будут получены с помощью манометра.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Типовой алгоритм расчета технико-экономических показателей конденсационных энергоблоков мощностью 300, 500, 800 и 1200 МВт. — М.: СПО, Союзтехэнерго, 1978. — 378 с.

УДК 621.1.016

В.К. СУДИЛОВСКИЙ, канд. техн. наук,  
В.В. КРАВЕЦ, инженер,  
Ю.В. МУЛЕВ, инженер,  
А.В. БУЗО, студент (БПИ)

### К ВОПРОСУ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВЛАЖНОГО ВОДЯНОГО ПАРА

Определение массового расходного паросодержания влажного водяного пара имеет большое значение как при изучении теплообмена и механизма течения пароводяной смеси, так и для режимных испытаний и регулирования технологических процессов в парогенераторах, ядерных реакторах и паровых турбинах.

Однако до сих пор непосредственное и непрерывное измерение паросодержания влажного пара не нашло практического решения. Одной из важных причин такого положения является отсутствие как теоретических, так и экспериментальных данных по диэлектрической проницаемости влажного водяного пара.

В связи с этим в отраслевой научно-исследовательской лаборатории оптимизации режимов и комплексной автоматизации тепловых электрических станций БПИ выполнено исследование электрофизических свойств влажного водяного пара на изобаре 0,294 МПа с использованием специального электронного преобразователя, предназначенного для получения непрерывного электрического сигнала по степени сухости водяного пара. Исследования проводились на экспериментальном стенде (рис. 1). Получение влажного пара заданной степени сухости достигалось путем дросселирования и последующего охлаждения перегретого пара, подаваемого на стенд из паровой магистрали с параметрами  $P = 1,2$  МПа,  $T = 500$  К. Для охлаждения использовалась техническая вода с температурой 288 К и давлением 0,5 МПа. Экспериментальный стенд представляет трехсекционный рекуператор типа "труба в трубе", выполненный из труб  $D_{\gamma} 32$  и  $D_{\gamma} 50$ . Длина каждой секции 3 м. Пар протекает по внутренним трубам теплообменника, охлаждающая вода — в межтрубном пространстве, причем по охлаждающей воде возможно отключение одной или двух секций. На выходе пара из последней секции теплообменника установлен емкостный датчик [1].

Расход пара измерялся диафрагмой с датчиком типа ДМ и вторичным прибором КСД-2 класса точности 0,2, расход охлаждающей воды — мерным

баком. Температура пара и воды измерялись платиновыми термометрами сопротивления гр. 21 со вторичным прибором КСМ-4 (класса точности 0,25), давление — пружинными манометрами класса точности 0,6.

Определение влажности пара производилось по его диэлектрической проницаемости, измеряемой при помощи электронного емкостного преобразователя, соединенного с проточным емкостным датчиком. Он содержит наружный цилиндр, устройства ввода, центральный электрод, внутренний цилиндр, подводящий и отводящий патрубки. Измерительная камера датчика

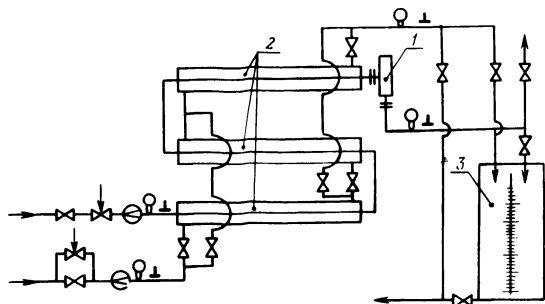


Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 — емкостный датчик; 2 — секция рекуператора; 3 — мерный бак.

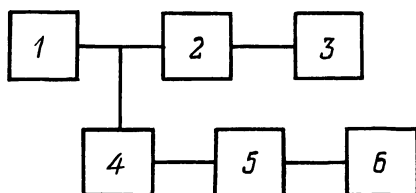


Рис. 2. Структурная схема емкостного преобразователя: 1 — высокочастотный генератор; 2 — катодный повторитель; 3 — показывающий прибор; 4,5 — соответственно внутренний и выносной колебательные контуры; 6 — емкостный датчик.

состоит из двух частей. Одна часть образована центральным электродом и внутренним цилиндром, вторая — центральным электродом и наружным цилиндром. В первой части измерительной камеры влажный пар, поступающий по подводящему патрубку, течет равномерным потоком и паразитная емкость, связанная с заполнением измерительной камеры, отсутствует. Во второй части равномерность нарушается вследствие поворота потока на  $180^\circ$ . При этом образуется некоторая паразитная емкость, но ее величина незначительна, так как она составляет небольшую долю от емкости второй части. Емкость же второй части сама по себе мала из-за существенно большего, чем в первой части отношения диаметров электродов и небольшой длины второй части, оптимальная величина которой определяется из условия равновеликости проходных сечений датчика. Такое выполнение конструкции датчика позволяет избежать тупиков участков и застойных зон в его измерительной камере.

Структурная схема емкостного преобразователя приведена на рис. 2. Рабочая частота преобразователя составляла  $4 \cdot 10^6$  Гц, что, с одной стороны, исключало явление поляризации, с другой — позволяло избежать погрешности измерений, связанной с явлением аномальной дисперсии.

Относительная погрешность измерения емкости составляла 0,5 %.

Обработка экспериментальных данных, полученных на стенде, сводилась в конечном итоге к получению функциональной зависимости диэлектрической проницаемости влажного пара  $\epsilon_{вп}$  от массового расходного паросодержания  $x$ .

Массовое расходное паросодержание на выходе из последней секции теплообменника рассчитывалось по известной зависимости:

$$x = \frac{i_{\text{Вых}}^{\text{п}} - i}{i'' - i'}$$

где  $i_{\text{Вых}}^{\text{п}}$  — энтальпия влажного пара на выходе из последней секции рекуператора;  $i'$ ,  $i''$  — соответственно энтальпии воды и водяного пара на линии насыщения при данном давлении.

В свою очередь энтальпия влажного пара на выходе из последней секции рекуператора  $i_{\text{Вых}}^{\text{п}}$  определяется из уравнения теплового баланса теплообменника:

$$i_{\text{Вых}}^{\text{п}} = i_{\text{Вх}}^{\text{п}} - \frac{G_{\text{в}}}{G_{\text{п}} \eta_{\text{ТП}}} (i_{\text{Вых}}^{\text{в}} - i_{\text{Вх}}^{\text{в}}),$$

где  $i_{\text{Вх}}^{\text{п}}$  — энтальпия перегретого пара на входе в первую секцию рекуператора;  $G_{\text{в}}$  — массовый расход охлаждающей воды;  $G_{\text{п}}$  — массовый расход перегретого пара;  $i_{\text{Вх}}^{\text{в}}$ ,  $i_{\text{Вых}}^{\text{в}}$  — соответственно энтальпии охлаждающей воды на входе и выходе теплообменника;  $\eta_{\text{ТП}}$  — к.п.д. теплового потока стенда.

Определение диэлектрической проницаемости влажного пара  $\epsilon_{вп}$  при установленном массовом паросодержании производилось по измеряемому приращению емкости датчика по сравнению с его емкостью в вакууме

$$\epsilon_{\text{вп}} = \frac{C_{\text{о}}^{\text{д}} + \Delta C_{\text{х}}}{C_{\text{о}}^{\text{д}}}$$

где  $C_{\text{о}}^{\text{д}}$  — активная емкость датчика влажности пара в вакууме;  $\Delta C_{\text{х}}$  — приращение активной емкости датчика при протекании влажного пара между его электродами.

Активная емкость использованного в экспериментах датчика определялась по методике, приведенной в [2], на химически чистом бензоле и воздухе при нормальных условиях при помощи измерителя емкости Е8-4 с классом точности 0,2 и составила  $42,15 \pm 0,09$  пФ.

Предварительно были выполнены теоретические расчеты диэлектрической проницаемости влажного пара от его паросодержания по модифицированной формуле В.И. Оделевского [3]

$$\epsilon_{\text{вп}} = \frac{\epsilon_{\text{п}} (3\varphi - 1) + \epsilon_{\text{в}} (2 - 3\varphi)}{4} + \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{п}} (3\varphi - 1) + \epsilon_{\text{в}} (2 - 3\varphi)}{16} + \frac{\epsilon_{\text{п}} \epsilon_{\text{в}}}{2}} \quad (1)$$

и по закону объемно-долевой аддитивности

$$\epsilon_{\text{вп}} = \epsilon_{\text{п}} \varphi + \epsilon_{\text{в}} (1 - \varphi), \quad (2)$$

где  $\epsilon_{\text{п}}$ ,  $\epsilon_{\text{в}}$  — соответственно диэлектрическая проницаемость пара и воды на линии насыщения при данном давлении;  $\varphi$  — истинное объемное паросодержание.

Пересчет истинного объемного паросодержания на массовое расходное паросодержание  $x$  производился по зависимости [4]

$$\varphi = \frac{x}{x + (1-x) \frac{v' \omega''}{v'' \omega'}}$$

где  $v'$ ,  $v''$  — соответственно удельный объем воды и водяного пара на линии насыщения при данном давлении;  $\omega'$ ,  $\omega''$  — соответственно скорости воды и водяного пара в данном сечении.

При расчете было принято равенство этих скоростей.

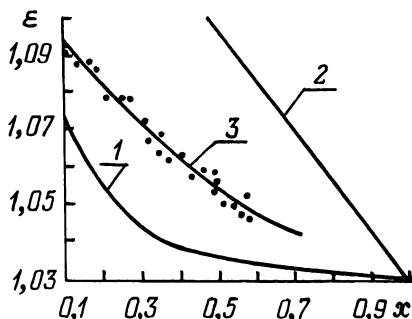


Рис. 3. Зависимости диэлектрической проницаемости влажного водяного пара от массового расходного паросодержания при давлении  $P = 0,294$  МПа: 1 — по формуле (1) В.И. Оделевского; 2 — по формуле (2); 3 — по результатам эксперимента.

На рис. 3 изображены зависимости диэлектрической проницаемости влажного водяного пара от массового расходного паросодержания при давлении  $P = 0,294$  МПа, рассчитанные по уравнениям (1), (2) и зависимость, полученная экспериментальным путем в диапазоне  $x = 0,1-0,7$ .

Экспериментальные данные описываются следующей формулой:

$$\epsilon_{\text{вп}} = 1 + 0,11 e^{-\frac{x}{0,81}}$$

которая обобщает полученные результаты в пределах общей погрешности эксперимента.

Как видно из рис. 3, имеются значительные отклонения экспериментальных данных как от закона объемно-долевой аддитивности, так и от статистической модели В.И. Оделевского, что требует расширения диапазона экспериментальных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 325546 (СССР). Емкостный датчик влажности газа/ В.К. Судилковский, И.В. Боярчук, М.А. Велюбский. — Опул. в Б.И., 1971, № 41. 2. Эмеф. Диэлектрические измерения. — М.: Химия, 1967, с. 73—74. 3. Оделевский В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем. — ЖТФ, 1951, т. 21, №6, с. 7—8. 4. Стрыкович М.А., Маргулова Т.Х., Катков В.Я. Процессы генерации пара на электростанциях. — М.: Энергия, 1969, с. 101—103.



Л.В. ШАТОН, инженер,  
В.И. ЧЕРНЫШЕВИЧ, инженер,  
А.П. ВАЛУЕВ, инженер,  
В.А. СЕДНИН, канд.техн.наук,  
А.М. ГАБРИЭЛЬ, канд.техн.наук,  
В.Н. РОМАНЮК, канд.техн.наук,  
А.П. НЕСЕНЧУК, канд.техн.наук (БПИ)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕСОРБЦИИ В ТЕРМОПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ

Настоящее экспериментальное исследование выполнено с целью уточнения структуры дисперсного потока, распределения полей температур и порозности потока. В связи с тем что двумерная математическая модель обладает достаточной полнотой для отражения основных физических закономерностей, наблюдаемых в термопсевдоожигенном слое, и не так трудоемка для решения, опыты выполнялись на двумерной модели [1]. Идея создания установки и постановки эксперимента вызвана в основном тем, что десорберы, разработанные в Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте, до настоящего времени, не были ориентированы на теоретическую обработку, а служили прототипами промышленных установок. Поэтому данные, полученные ранее на этих десорберах, не отражали специфику численного расчета и не могли служить точным подтверждением последнего.

Целью эксперимента являлось определение температур, остаточной степени насыщения цеолита углекислотой и распределения порозности потока в десорбере с псевдоожигенным слоем цеолита MgA (CaA).

Исходным физическим представлением для постановки эксперимента было существование устойчивого термопсевдоожигенного дисперсного потока вблизи вертикальной плоской греющей стенки.

Варьируемыми параметрами были: исходная степень насыщения цеолита углекислотой; температура греющих поверхностей; расход насыщенного цеолита, т.е. скорость потока сорбента в десорбере.

В эксперименте измерялись: начальная степень насыщения цеолита углекислотой; степень насыщения цеолита углекислотой после охлаждения его через десорбер; расход цеолита; распределение температур вдоль греющей поверхности; двумерный профиль температур дисперсного потока. Кроме того, самостоятельно производилось рентгеновское фотографирование потока с целью исследования распределения плотности дисперсного материала.

Схема экспериментальной установки для измерений в термопсевдоожигенном слое изображена на рис. 1.

Из бункера 1 насыщенный углекислотой цеолит попадает в десорбер 15. Скорость подачи цеолита регулируется сопротивлением дисперсного слоя в десорбере. Сам десорбер представляет собой кварцевый сосуд прямоугольной формы размерами 350x120 x 30 мм. Сверху десорбер открыт, снизу имеются отверстия, куда вставлены патрубки для отвода цеолита. Расход цеолита через десорбер регулируется клапанами 11. Термическая десорбция

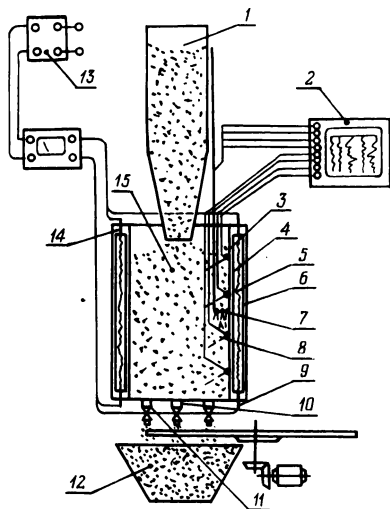


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения двумерного профиля температур в десорбере с термопсевдооживленным слоем.

реализуется в результате нагрева потока плоскими боковыми нагревателями 5. Эти нагреватели представляют собой медные пластины, к которым приварены две медные вертикальные трубки 6. В каждой трубке смонтирована галогенная лампа 7 (КГ 220-1000) максимальной мощностью 1 кВт. Подвод напряжения осуществляется с помощью наружных контактов 14 и 9. Нагреватели изолированы от сосуда асбестовой прокладкой 6. Температура греющей поверхности измеряется в четырех точках хромелькопелевыми

термопарами 8, зачеканенными в одну из греющих поверхностей на расстоянии 3 см друг от друга. Высота дисперсного слоя в десорбенте составляет 20 см. Из десорбента цеолит попадает в сосуд 12.

Двумерный профиль температур дисперсного материала в десорбенте измерялся с помощью подвижного блока термопар, склеенных между собой в один жгут. Головки 7 термопар находятся на расстоянии 3 мм друг от друга и в 10 мм от жгута. Жгут изогнут под прямым углом и прикреплен к металлическому стержню координатного устройства. На стержень нанесена шкала для определения глубины погружения термопар. Первая термопара касается стенки, фиксируя положение блока по горизонтали.

Показания термопар выводятся на светолучевой осциллограф 3, что позволяет вести непрерывный контроль, запись температур и фиксировать момент наступления события в ходе эксперимента. Использование гальванометров разной чувствительности обеспечивает измерение даже небольших отклонений температуры от начальной температуры потока.

Нагреватели питаются от трансформатора 13 через измерительный комплект К-505, позволяющий контролировать ток, напряжение и мощность на нагревателях.

Подготовка эксперимента заключалась в насыщении цеолита углекислотой до требуемой величины, тарировании гальванометров светолучевого осциллографа и регулировке выпускных патрубков десорбера с целью достижения равномерности потока цеолита в десорбере. Процесс насыщения углекислотой прекращается после достижения навеской заданной массы, определяемой по формуле

$$M_{6.ц}CO_2 = (1 + a) (M_{6.ц} - M_6) + M_6,$$

где  $a$  — необходимая степень насыщения, г/г;  $M_{6.ц}$  — масса баллона с цеолитом после прокаливании;  $M_6$  — масса баллона без цеолита.

Регулировка равномерности потока цеолита через десорбер выполнялась при помощи порции подкрашенного цеолита, во время прохождения которой производилось уточнение как расхода цеолита, так и равномерности его потока. Регулировка производилась клапанами 11 (рис. 1).

Измерение температур и степени регенерации цеолита в десорбере происходило следующим образом. Патрубки 10 в нижней части перекрывались пробками, подвижный блок термомпар помещался на дно десорбера. Цеолит, насыщенный углекислотой до определенной степени, засыпался в бункер и заполнял весь объем десорбера. Включался осциллограф и отмечалась начальная температура цеолита. Постепенно мощность нагревателей доводилась до заданного уровня, аппарат прогревался. После того как начинал кипеть цеолит в десорбере, открывались пробки выпускных патрубков, и на ленте осциллографа делалась отметка о начале работы десорбера. Далее велось наблюдение за стабильностью показаний термомпар: как только показания термомпар на блоке стабилизировались, он поднимался на 40 мм выше. Это обеспечивало измерение температур слоя по всей высоте. Во время работы десорбера делались отборы проб цеолита. После того как весь цеолит из бункера переходил в сосуд 12, осциллограф и нагреватели выключались, сосуд с цеолитом взвешивался и помещался в печь для окончательной десорбции. После прокаливания проводилось повторное взвешивание.

Расход цеолита через десорбер определялся по формуле

$$B = \frac{M_{ц.с} - M_c}{\tau_{эксп}}$$

где  $M_{ц.с}$  — масса сосуда 12 с цеолитом после прокаливания;  $M_c$  — масса сосуда 12;  $\tau_{эксп}$  — время эксперимента, определяемое по записи осциллографа.

Средняя степень остаточного насыщения после десорбера определялась по формуле

$$a_{ост} = \frac{M_{ц.с} CO_2 - M_{ц.с}}{M_{ц.с} - M_c}$$

где  $M_{ц.с} CO_2$  — масса сосуда 12 с цеолитом до прокаливания.

Степень насыщения в отобранных пробах определялась по аналогичной методике.

На рис. 2, а—з представлены результаты измерения двумерных профилей температур в термомсевдооживленном потоке, полученные на описанной в данной работе установке. Каждый из этих рисунков отражает цикл измерений, проведенных при изменении какого-либо одного параметра, причем исходным являлось состояние десорбера, определяемое параметрами рис. 2, а. На этих же рисунках нанесены кривые (сплошные линии), полученные численным методом решения модели процессов тепло- и массообмена в термокипящем слое, которая, как видно из рис. 2, а—з, удовлетворительно аппроксимирует экспериментальные данные.

К числу характерных особенностей термокипящего слоя следует отнести то, что процесс десорбции проходит непосредственно у греющей поверхности,

и дисперсный поток нагревается мало. Линии рис. 2 быстро опускаются при удалении от стенки. Причем "экранирующее" действие десорбирующего пограничного слоя сорбента усиливается с нарастанием интенсивности переме-

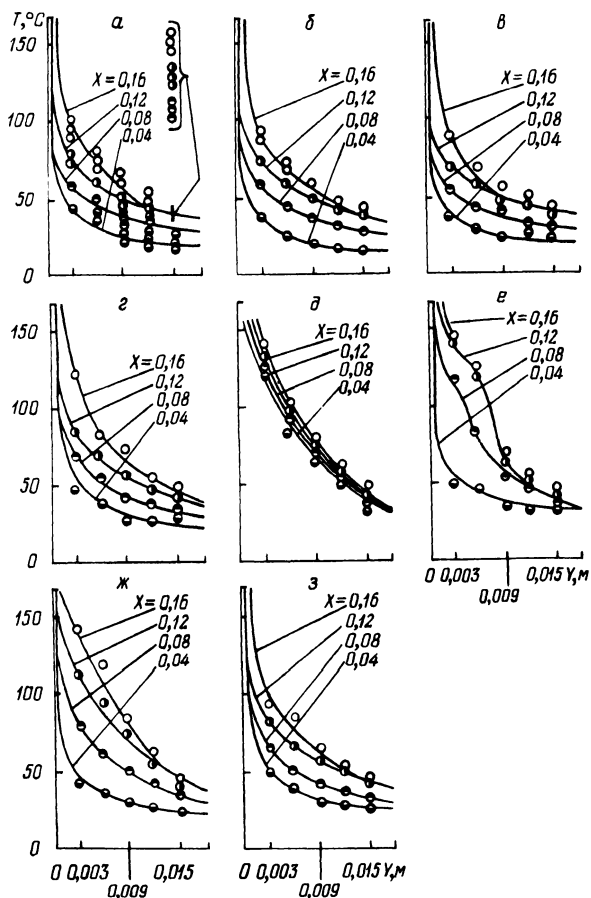


Рис. 2. Результаты измерения двумерного профиля температур в десорбере (общее исходное состояние для всех случаев задается параметрами):  $T_{ст} = 573 \text{ K}$ ,  $d = 0,092 \cdot 10^3 \text{ м}$ ,  $G = 8,3 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ,  $a_0 = 0,1 \text{ кг/кг}$ ,  $T_0 = 293 \text{ K}$ ; а — исходное состояние; б —  $T_{ст} = 473 \text{ K}$ ; в —  $T_{ст} = 523 \text{ K}$ ; г —  $T_{ст} = 623 \text{ K}$ ; д —  $G = 2,5 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ; е —  $G = 5,0 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ; ж —  $a_0 = 0,075 \text{ кг/кг}$ ; з —  $a_0 = 0,09 \text{ кг/кг}$ .

шивания. Когда же псевдоожигание отсутствует или затрагивает лишь верхние слои потока, последний, как видно из рис. 2, а и 2, д, подвергается более сильному разогреву.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Процессы тепло- и массопереноса в кипящем слое/ А.П. Баскаков, Б.В. Берг, А.Ф. Рыжков, Н.Ф. Филипповский. — М.: Энергия, 1978. — 320 с.

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО, ЭКОНОМИЧЕСКИ ДОПУСТИМОГО РАССТОЯНИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ОТ АЭС

При выполнении работ перспективного характера, например определения технико-экономической целесообразности использования конкретных АЭС для теплоснабжения, возникает необходимость выполнения обосновывающих расчетов. Одним из основных параметров, ограничивающих теплоснабжение от АЭС, является расстояние до потребителей тепла — длина транзитного теплопровода от станции до одного из пиковых источников тепла в городе.

В качестве альтернативного варианта рассматривается отдельная схема теплоснабжения с котельными на органическом топливе. Предполагается, что при наличии нескольких пиковых котельных они связаны между собой теплопроводами.

Искомый параметр можно найти методом уравнивания приведенных затрат в систему теплоснабжения с АЭС в качестве базового теплоисточника и затрат в отдельную схему теплоснабжения с котельными на органическом топливе. Основными исходными данными для расчетов приняты следующие: установленная конденсационная электрическая мощность АЭС или ее отдельных блоков, используемых для теплоснабжения  $N_{\text{АЭС}}^{\text{К}}$ , МВт; тепловая нагрузка системы теплоснабжения  $q_{\text{сцт}}$ , МВт; расчетная температура подогрева воды на АЭС  $t_1^{\text{р}}$ ; коэффициент теплофикации  $a_{\text{АЭС}}$ ; доля нагрузки горячего водоснабжения в суммарной нагрузке  $\varphi^{\text{и}}$  и отопительной нагрузке  $\varphi$ .

В качестве математических выражений приведенных затрат в транзитный теплопровод  $z^{\text{ТР}}$  (на 1 км), в котельные районные  $z^{\text{РК}}$ , пиковые  $z^{\text{ПК}}$  и другие составляющие затраты можно использовать формулы работы [1], нормативные материалы проектных организаций. С целью учета конфигурации графика тепловой нагрузки по продолжительности используется известное аналитическое выражение для определения годового коэффициента теплофикации  $a_{\text{ДХ}}^{\text{год}}$  от их максимально-часовых значений [2]. Однако ряд зависимостей, в частности, связь электрической мощности турбины от параметров теплофикационных отборов имеет достаточно сложный характер. С целью преодоления указанных затруднений были получены аппроксимационные формулы, позволяющие представить некоторые зависимости в достаточно простой аналитической форме.

При разработке аналитической зависимости для расчета затрат на компенсацию недовыработки электроэнергии были приняты следующие предположения и допущения:

- равномерное распределение тепловой нагрузки по всем энергоблокам (или турбинам) АЭС, используемым для теплоснабжения;
- рассматривается двухтрубный транспорт теплоты от АЭС и система теплоснабжения с закрытой схемой горячего водоснабжения;

— недовыработка электроэнергии определяется по среднеотопительному и среднелетнему режимам;

— электрическая мощность турбин АЭС рассчитывается как функция температуры сетевой воды в подающем трубопроводе и тепловой нагрузки по полученным аппроксимационным формулам;

— в качестве замещающей станции рассматриваются варианты: I — КЭС с блоками на органическом топливе; II — новая АЭС с учетом уменьшения расхода органического топлива на КЭС, разгружаемым по мере увеличения электрической мощности АЭС в неотопительный период.

Зависимость изменения электрической мощности от тепловой нагрузки  $q_{\text{АЭС}}^I$  и температуры подогрева сетевой воды, например по результатам расчета тепловых схем турбины К-500-65/3000 с нерегулируемыми отборами тепла, может быть аппроксимирована формулой

$$\Delta N_{\text{АЭС}}^I = \begin{cases} 0,387 \cdot q_{\text{АЭС}}^T \cdot t_1^{0,307} & \text{для } t_1 > 110 \text{ }^\circ\text{C}; \\ 0,000129 q_{\text{АЭС}}^T \cdot t_1^{1,52} & \text{для } t_1 \leq 110 \text{ }^\circ\text{C}. \end{cases}$$

При этом необходимо иметь в виду, что тепловая нагрузка турбины для заданной температуры подогрева сетевой воды в транзитном теплопроводе не может превышать технически возможной для данного варианта реконструкции турбины.

Количество замещаемой электроэнергии определяется по средним нагрузкам отборов за отопительный и неотопительный периоды. Величины удельных замыкающих затрат на электроэнергию в зависимости от способа учета компенсации недовыработки электроэнергии можно записать

$$z_{\text{ЭЭ}}^I = z_{\text{ЭЭ}}^{\text{б}} - 8 \left( 1 - \frac{\tau_{\text{АЭС}}}{\tau} \right);$$

$$z_{\text{ЭЭ}}^{\text{II}} = z_{\text{ЭЭ}}^{\text{б}} \cdot \frac{\tau_{\text{АЭС}}}{\tau} - b_{\text{КЭС}} \cdot z_{\text{от}} \cdot \frac{\tau_{\text{АЭС}} - \tau_{\text{АЭС}}^T}{\tau_{\text{АЭС}}},$$

где  $\tau_{\text{АЭС}}$  — годовое число часов использования установленной мощности базовой конденсационной АЭС равное не менее 6500, ч/год;  $z_{\text{ЭЭ}}^{\text{б}}$  — замыкающие затраты на электроэнергию базовой АЭС, руб/МВт·ч;  $b_{\text{КЭС}}$  — удельный расход условного органического топлива на разгружаемых КЭС, кг/МВт·ч;  $\tau_{\text{АЭС}}^T$  — число часов использования установленной мощности АЭС при эксплуатации ее для теплоснабжения, определяемое по годовой недовыработке электроэнергии и максимальному снижению электрической мощности.

Температуры сетевой воды в среднелетнем режиме в подающем  $t_{1\text{ср.л}}$  и обратном  $t_2$  трубопроводах транзитной тепломагистрали в зависимости от фиктивной температуры  $t_1^\Phi$  аппроксимированы по среднестатистическим данным.

Диаметр  $d_{пр}$  и число подающих транзитных трубопроводов  $g$  выбирается с учетом резервирования, допустимое аварийное снижение тепловой нагрузки — 70 %. Удельные приведенные затраты в транзитный теплопровод определяются с учетом аппроксимированной зависимости величины удельных потерь от температуры. Пренебрегая малыми величинами, упрощается выражение для приведенных затрат в котельные на органическом топливе.

На основе усреднения результатов расчета эколого-экономического эффекта от использования АЭС для теплоснабжения  $Z_{ЭК}$  и с учетом показателей вредности топлива и продуктов сгорания можно записать

$$Z_{ЭК} = 1,9 a_{АЭС}^{год} \cdot Q_{сцт} \cdot T_{К},$$

где  $Q_{сцт}$  — годовой расход тепла на теплоснабжение, МВт·ч;  $T_{К}$  — коэффициент, характеризующий относительную степень экологического воздействия различных типов котельных от сжигания органического топлива [3].

В результате получено аналитическое выражение для определения предельного экономически допустимого расстояния транспорта теплоты от АЭС

$$\begin{aligned} L_{пр} = & \left\{ [p_{н} \cdot k_{рк}^{уд} + p_{об} (p_{на}^к \cdot k_{рк}^{уд})] \cdot q_{сцт} + Q_{сцт} \cdot b_{ок} \cdot z_{от} + \right. \\ & + 1,9 a_{АЭС}^{год} \cdot Q_{сцт} \cdot T_{К} - [\Delta N_{АЭС}^{ср.0} \cdot \tau_{оп} + \Delta N_{АЭС}^{ср.л} (8400 - \tau_{оп})] \times \\ & \times 10^{-3} z_{ээ} (\tau_{АЭС}^т) - \frac{205 a_{АЭС} q_{сцт}}{t_1^p - t_2} - \frac{753 \cdot 10^{-3}}{t_1^p - t_2} \cdot a_{АЭС}^{год} \cdot Q_{сцт} \cdot z_{ээ}^6 - \\ & - (1 - a_{АЭС}) \cdot q_{сцт} [p_{н} \cdot k_{пр}^{уд} + p_{об} (p_{на}^к \cdot k_{пк}^{уд})] - (1 - a_{АЭС}^{год}) \times \\ & \times Q_{сцт} \cdot b_{ок} \cdot z_{от} \left. \right\} \cdot \left\{ 0,2 (g \cdot k_{стр} + r \cdot k_{стр}^0) + 2,754 \frac{q_{сцт}^3 \cdot a_{АЭС}^3}{(t_1 - t_2)^3} \cdot 10^{-3} z_{ээ}^6 \times \right. \\ & \times \left( \frac{1}{d_{пр}^{5,25} \cdot g^2} + \frac{1}{d_{обр}^{5,25} \cdot r^2} \right) + \left\{ g \cdot d_{пр} [1,2 (t_1^p + t_{1ф}^{0,44} + 70) + 69] + \right. \\ & \left. \left. + r \cdot d_{обр} \cdot [1,2 \cdot (t_2^p + 47 - t_{1ф}^{0,528}) + 69] \right\} \cdot 10^{-3} z_{от} \right. \end{aligned}$$

где  $p_{н}$  — нормативный коэффициент эффективности капложений;  $p_{об}$ ,  $p_{на}^к$  — коэффициенты, учитывающие общестанционные издержки, отчисления на амортизацию и текущий ремонт;  $\tau_{оп}$  — длительность отопительного периода, ч/год;  $k_{рк}$ ,  $k_{рк}^к$  — удельные капиталовложения в котельные на органическом топливе, тыс.руб./МВт (т);  $b_{ок}$  — удельный расход условного органического топлива на котельных, кг/МВт·ч;  $k_{стр}$  — удельные капиталовложения на строительство подающих трубопроводов (с индексом "0" — обратных), тыс.руб./км;  $d_{обр}$ ,  $r$  — диаметр (м) и число обратных трубопроводов.

Погрешность расчетов по полученному выражению по сравнению с результатами расчетов на ЭВМ составляет 12–30 %. Введением понижающего коэффициента 0,79 можно уточнить формулу, а ее погрешность составит примерно  $\pm 9\%$ .

Таким образом, разработанная аналитическая методика определения экономически допустимого расстояния теплоснабжения может быть использована при выполнении расчетов по определению технико-экономической целесообразности использования АЭС для теплоснабжения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. — М.: Энергия, 1975. — 376 с.
2. Соколов Е.Я., Сазонов Б.В., Иванов Г.В. Оптимизация режимов совместной работы теплофикационных турбин типа Т и ПТ. — Теплоэнергетика, 1975, № 12, с. 12—16.
3. Энергетика и охрана окружающей среды./Под ред. Н.Г. Залогина, Л. И. Кроппа, Ю.М. Кострикина. — М.: Энергия, 1979, с. 89.



## СОДЕРЖАНИЕ

Ганжин А.А., Малевич Ю.А., Никанов А.Р. Эффективность использования топливно-энергетических ресурсов в промышленности БССР . . . . . 3

### Электроэнергетика

Александров В.Н., Забелло Е.П. Оценка вероятностей различных состояний воздушных линий электропередачи в условиях эксплуатации . . . . .	8
Короткевич М.А., Сантьяго Лахес Чой. К оценке удельной стоимости потерь электроэнергии . . . . .	12
Новаш В.И., Бобко Н.Н., Негневицкий М.В. Перспективы применения микро-ЭВМ для комплексной автоматизации сельских распределительных сетей 6–20 кВ. . . . .	16
Ратманов С.М. Линейная математическая модель утяжеления режима электроэнергетической системы . . . . .	19
Федин В.Т., Белянчев Ю.В., Ступак И.А. Экономическая оценка некоторых показателей надежности сверхпроводящих линий электропередачи . . . . .	23
Демиденко Л.И., Назаренко Л.П., Яцкевич В.В. Технико-экономический анализ устройств антенного отбора мощности. . . . .	25
Падалко Л.П., Баранников А.И. Текущее планирование развития распределительной электрической сети в условиях неполной информации . . . . .	29
Шульга А.Н. Расчет сопротивления растеканию сосредоточенных заземлителей в неоднородной земле . . . . .	32
Прокочик В.В., Кудрин Б.И. Проблемы определения электрических нагрузок промышленных предприятий . . . . .	35
Полищук А.А. О группировке электронов в электростатическом поле . . . . .	39

### Электрооборудование промышленных предприятий

Черномашенцев В.Г., Пацкевич В.А., Курилин С.Л. Методика расчета элементов инвертора с параметрической стабилизацией режима работы . . . . .	44
Костюковской А.Г. Области устойчивости автоматической системы управления гелиостатом . . . . .	47
Фираго Б.И., Сидоров В.Г., Должников С.Ю. Исследование динамики асинхронного двигателя при питании от тиристорного циклоконвертора . . . . .	51
Скрачко К.Г., Иванова С.Н., Ржевская С.П. Влияние магнитных шунтов на энергетические характеристики индукторов . . . . .	57
Бурдыкин И.В., Петренко Ю.Н. Преобразователь частоты для питания асинхронного электродвигателя . . . . .	60
Розум Т.Т. Расчет двухконтурной феррорезонансной цепи с помощью направленного графа . . . . .	63
Балуева Г.И., Ильин О.П., Игнатович В.Б. К вопросу определения экономической эффективности замены импортного оборудования отечественными аналогами . . . . .	68
Анхимюк В.Л., Слукка М.П. Синтез оптимальной релейной системы стабилизации частоты вращения электропривода . . . . .	73
Ильин О.П., Беляев В.П., Головач О.А. Транзисторный регулятор напряжения переменного тока . . . . .	78
Беляев В.П., Сидоров В.Г., Фираго Б.И. О рациональной записи уравнений асинхронной машины при управлении от циклоконвертора . . . . .	81
Баханович Г.А. Измерительный преобразователь внутреннего угла синхронных машин . . . . .	84
Гульков Г.И. Оптимальное управление процессом плоского шлифования . . . . .	86

### Теплоэнергетика

Северянин В.С., Дерещук Е.М. Интенсификация теплопроводности устройствами пульсирующего горения . . . . . 92

Л и т в и н е ц В.И., Р у б а х и н В.Б., Н а з а р о в В.И. Оценка временной погрешности аппроксимации кривых ортогональным методом моментов . . . . .	95
С у д и л о в с к и й В.К., М у л е в Ю.В., К р а в е ц В.В., Б о б р о в В.В. К вопросу определения энтальпий воды и водяного пара по линии насыщения . . . . .	98
С у д и л о в с к и й В.К., К р а в е ц В.В., М у л е в Ю.В., Б у з о А.В. К вопросу измерения диэлектрической проницаемости влажного водяного пара . . . . .	101
Ш а т о н Л.В., Ч е р н ы ш е в и ч В.И., В а л у е в А.П., С е д н и н В.А., Г а б р и э л ь А.М., Р о м а н ю к В.Н., Н е с е н ч у к А.П. Экспериментальное исследование десорбции в термопсевдоожоженном слое. . . . .	105
Я к о в л е в Б.В., Г л ю з а А.Т. Аналитическая методика определения предельного, экономически допустимого расстояния теплоснабжения от АЭС. . . . .	109

## НАУЧНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ.

### В ы п у с к 10

Зав.редакцией *А.Я. Канторович*. Редактор *Г.В. Вагабова*. Мл.редактор *А.Я. Сыромятникова*. Худож.редактор *Ю.С. Сергачев*. Техн.редактор *Г.А. Лакишик*. Корректоры *А.М. Апель, З.Б. Звонарева*. График *Н.В. Журавлева*. Оператор *И.В. Скубий*.

ИБ № 1588

Подписано в печать 27.09.83 г. АТ 16190. Формат 60х90 1/16. Бумага офсет. Офсет. печать. Гарнитура Универс. Усл.-печ.л. 7,5. Усл.-кр.отт. 8,0. Уч.-изд.л. 8,52. Тираж 350 экз. Зак. 6199. Цена 1р. 40 к.

Издательство "Вышэйшая школа" Государственного комитета БССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 220048. Минск, проспект Машерова, 11.

Типография "Победа". Молодечно, ул. Тавляя, 11.

Отпечатано с оригинала-макета, изготовленного в издательстве "Вышэйшая школа".

## РЕФЕРАТЫ

УДК 621.311.22:621.1.013

Ганжин А.А., Малевич Ю.А., Никанов А.Р. Эффективность использования топливно-энергетических ресурсов в промышленности БССР. — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 3—7.

Излагаются результаты обследования и оценки промышленных предприятий БССР по использованию тепла и топлива в теплотехнологических установках. Показано, что в республике имеются значительные резервы использования вторичных энергоресурсов, дан анализ объектов выхода их, предложен ряд организационно-технических мероприятий по учету и использованию вторичных энергоресурсов на крупных промышленных предприятиях.

УДК 621.315.1

Александров В.Н., Забелло Е.П. Оценка вероятностей различных состояний воздушных линий электропередачи в условиях эксплуатации. — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 8—12.

Рассматривается применение теории марковских процессов для оценки вероятностей состояний воздушных линий с учетом анализа эксплуатации. — Ил. 1. Библиогр. 2.

УДК 621.316

Короткевич М.А., Сантьяго Лахес Чой. К оценке удельной стоимости потерь электроэнергии. — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 12—15.

Определены области изменения значений удельной стоимости потерь электроэнергии в функции времени потерь при изменении влияющих факторов для локальной энергосистемы. Проведен сравнительный анализ определения стоимости одного киловатт-часа потерянной электроэнергии различными методами. Показано, что результаты, полученные по замыкающим оценкам стоимости электроэнергии как комбинациям показателей базисных и пиковых электростанций, отличаются в среднем на 10,7% от аналогичных результатов, определенных по ранее применявшимся выражениям.

При этом стоимость топлива принята соответствующей ценам на мировом рынке. — Ил. 1. Библиогр. 3.

УДК 621.315:1:621.317.333.4

Новаш В.И., Бобко Н.Н., Негневицкий М.В. Перспективы применения микро-ЭВМ для комплексной автоматизации сельских распределительных сетей 6—20 кВ. — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 16—18.

Рассматривается возможность применения микро-ЭВМ для выполнения функций релейной защиты, автоматики и контроля состояния сети. Отмечается, что применение микро-ЭВМ повысит качественные показатели защиты и автоматики, расширит их функциональные возможности. — Библиогр. 4.

УДК 621.311.016.351.001.24

Ратманов С.М. Линейная математическая модель утяжеления режима электроэнергетической системы. — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 19—22.

Изложена методика безытерационного расчета установившихся режимов электроэнергетической системы при утяжелении их по статической устойчивости. Приведен алгоритм моделирования заданной траектории утяжеления режима на базе частотно-фазового метода. — Ил. 1. Библиогр. 5.

*УДК 621.315.21:537.312.62*

**Федин В.Т., Белянчев Ю.В., Ступак И.А.** Экономическая оценка некоторых показателей надежности сверхпроводящих линий электропередачи. — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 23—25.

Представлена сверхпроводящая линия электропередачи и надежность работы в зависимости от вероятности отказов ее отдельных элементов. Указаны пути снижения числа отказов (повышение надежности) за счет увеличения коэффициентов запаса по току и напряжению, которые выбираются с учетом технико-экономического решения. Исследовано с помощью ЭЦВМ влияния этих коэффициентов на приведенные затраты при различных мощностях СП ЛЭП и примененных видов сверхпроводников. — Ил. 2.

*УДК 621.316:621.371.003.1*

**Демиденко Л.И., Назаренко Л.П., Яцкевич В.В.** Технико-экономический анализ устройств антенного отбора мощности. — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 25—29.

Для сельскохозяйственных потребителей, территориально расположенных вдоль трасс высоковольтных линий электропередачи, перспективными являются подстанции делителей напряжения (ПДН) различных типов. Эти подстанции имеют непосредственное присоединение к высоковольтной линии (ВЛ) 110 кВ и выше и отличаются делителями напряжения. Так, ПДНИ используют в качестве делителя индуктивности, ПДНК — конденсаторы, ПДНТ — грозозащитные троссы и предлагаемые для рассмотрения ПДНА — антенны, расположенные под фазными проводами высоковольтных линий. — Ил. 2. Библиогр. 4.

*УДК 621.311.017*

**Падалко Л.П., Баранников А.И.** Текущее планирование развития распределительной электрической сети в условиях неполной информации. — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 29—32.

Освещается методика разработки текущего плана развития распределительной сети в условиях неполной исходной информации. — Библиогр. 3.

*УДК 621.316.99.001.24*

**Шульга А.Н.** Расчет сопротивления растеканию сосредоточенных заземлителей в неоднородной земле. — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 32—35.

Изложены основы методики расчета сопротивления растеканию горизонтального, вертикального заземлителей и прямоугольной пластины в многослойной земле. Рассмотрены вопросы построения алгоритма расчета сопротивления растеканию на ЭВМ. — Библиогр. 4.

*УДК 621.311.153.001*

**Прокопчик В.В., Кудрин Б.И.** Проблемы определения электрических нагрузок промышленных предприятий. — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 35—39.

На основе данных по предприятиям черной металлургии анализируются причины ошибок в определении расчетных нагрузок промышленных предприятий. Предлагается комплексный метод расчета электрических нагрузок и система показателей электрического хозяйства промышленных предприятий, на которой он основывается. — Ил. 1. Библиогр. 3.

*УДК 621.37/39*

**П о л и щ у к А.А. О группировке электронов в электростатическом поле.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 39—43.

Дан анализ явлений в клистронном генераторе с учетом объемного заряда в области отрицательного поля на основе аппроксимации истинной кривой распределения потенциала ломаной. Показана зависимость коэффициента эффективности группирования электронного потока от параметра плотности объемного заряда. — Ил. 4. Библиогр. 2.

*УДК 621.314.632*

**Ч е р н о м а ш е н ц е в В.Г., Пацкевич В.А., Курилин С.Л. Методика расчета элементов инвертора с параметрической стабилизацией режима работы.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 44—47.

Рассматривается методика определения параметров основных элементов последовательного мостового инвертора с параметрической стабилизацией режима. Основные положения данной методики базируются на анализе электромагнитных процессов. Экспериментальная проверка методики показала ее справедливость для установок мощностью более 20 кВт. — Библиогр. 3.

*УДК 621.3.078.001*

**К о с т ю к о в с к и й А.Г. Области устойчивости автоматической системы управления гелиостатом.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 47—51.

Определена передаточная функция автоматической системы управления гелиостатом (АСУ ГС), которая представляет собой двухканальную взаимосвязанную систему четвертого порядка. Проанализированы области устойчивости АСУ ГС с основными типами регуляторов. Построенная зависимость в параметрах регулятора позволяет при заданных параметрах гелиостата и скоростях его перемещения осуществить предварительный выбор типа регулятора для АСУ ГС. — Ил. 1. Библиогр. 4.

*УДК 621.314.26*

**Ф и р а г о Б.И., Сидоров В.Г., Должников С.Ю. Исследование динамики асинхронного двигателя при питании от тиристорного циклоконвертора.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 51—57.

Рассмотрена методика исследования динамики системы циклоконвертор — асинхронный двигатель при приближенном учете электромагнитных процессов в двигателе и линеаризации дифференциальных уравнений, составленных по первой гармонике питающего двигатель напряжения. Проведено сопоставление расчетных и экспериментальных кривых при набросе частоты и момента в системе, состоящей из трехфазно-трехфазного однополупериодного циклоконвертора и асинхронного двигателя типа АО2-42-6. — Ил. 2. Библиогр. 5.

*УДК 66.023/025:621.301.7*

**С к а ч к о К.Г., Иванова С.Н., Ржевская С.П. Влияние магнитных шунтов на энергетические характеристики индукторов.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 67—69.

Приведены результаты экспериментальных исследований индукционного нагревателя для макета индуктора, определены закономерности измерения основных расчетных параметров в рабочем диапазоне температур и показана роль магнитного экранирования. — Ил. 2. Библиогр. 4.

*УДК 62—83:621*

**Бурдыкин И.В., Петренко Ю.Н. Преобразователь частоты для питания асинхронного электродвигателя.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 60—63.

Рассматривается преобразователь частоты для асинхронного электропривода на принципе отслеживания кривой выходного напряжения, позволяющий получить низкий коэффициент гармоник. Приведена функциональная схема цифрового трехфазного генератора опорного синусоидального напряжения. — Ил. 4. Табл. 1. Библиогр. 2.

*УДК 621.318.435.001.24*

**Розум Т.Т. Расчет двухконтурной феррорезонансной цепи с помощью направленного графа.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 63—67.

Построен направленный граф двухконтурной феррорезонансной цепи, на основе которого составлен алгоритм расчета переходных и установившихся процессов. Выбор типа аппроксимации кривой намагничивания стальных сердечников при этом не имеет принципиального значения. Желаемая точность достигается увеличением числа итераций или уменьшением интервала. Проведено сравнение расчетных характеристик с результатами моделирования на АВМ. — Ил. 3. Библиогр. 3.

*УДК 677.052:658.152.011.46*

**Балueva Г.И., Ильин О.П., Игнатович В. Б. К вопросу определения экономической эффективности замены импортного оборудования отечественными аналогами.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 68—72.

Выполнен анализ экономической эффективности замены электронных плат силовых преобразователей частоты, управляющих работой химико-пряядильных машин, западно-германских фирм отечественными аналогами. Определен размер эффекта от частичной замены плат преобразователей, а также от замены импортных СПЧ отечественными аналогами. — Табл. 2. Библиогр. 3.

*УДК 62-50:62-83*

**Анхимюк В.Л., Слукa М.П. Синтез оптимальной релейной системы стабилизации частоты вращения электропривода.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 73—77.

Рассматривается синтез релейной системы стабилизации частоты вращения электропривода, оптимальной в смысле заданного интегрально-квадратичного критерия и обладающей нечувствительностью к параметрическим и координатным возмущениям. Предлагается методика аналитического конструирования по заданному качеству системы релейного управления при неизвестных весовых коэффициентах функционала. Вычислительная процедура обоих методов сведена до простейших выражений и формализованных правил, что имеет существенное преимущество по сравнению с известными методами синтеза оптимальных релейных систем стабилизации частоты вращения электропривода. — Ил. 1. Табл. 1. Библиогр. 4.

*УДК 621.314.2.072.2*

**Ильин О.П., Беляев В.П., Головач О.А. Транзисторный регулятор напряжения переменного тока.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 78—80.

Рассматривается одно из схемных решений регулятора напряжения переменного тока на транзисторах. Приводятся результаты экспериментальных исследований регулятора при его работе на асинхронный двигатель. Дается их анализ. — Ил. 3. Библиогр. 1.

*УДК 621.313.333*

**Беляев В.П., Сидоров В.Г., Фираго Б.И. О рациональной записи уравнений асинхронной машины при управлении от циклоконвертора.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 81—84.

Предложена и обоснована форма записи дифференциальных уравнений трехфазной асинхронной машины, позволяющая упростить анализ на ЦВМ переходных процессов в машине при частотном управлении от тиристорного циклоконвертора с естественной коммутацией. — Ил. 1. Библиогр. 3.

*УДК 621.317.1*

**Баханович Г.А. Измерительный преобразователь внутреннего угла синхронных машин.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 84—86.

Рассматривается устройство и принцип действия тиристорного измерительного преобразователя внутреннего угла синхронных машин.

Применение практически безынерционного датчика, фиксирующего положение ротора относительно поля статора, позволяет получить высокую точность измерения и стабильность показаний в установившемся и динамическом режимах. — Ил. 2. Библиогр. 4.

*УДК 621.9.014.001.24*

**Гульков Г.И. Оптимальное управление процессом плоского шлифования.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 86—91.

Предлагается методика определения оптимального управления процессом плоского шлифования при оптимизации по критерию максимума производительности. Показана необходимость введения в целевую функцию времени реверсирования стола с деталью. Приведены графики, иллюстрирующие предложенную методику. — Ил. 2. Библиогр. 4.

*УДК 541.126.662.62.001.5*

**Северянн В.С., Дерещук Е.М. Интенсификация теплопроводности устройствами пульсирующего горения.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 92—94.

Представлен экспериментальный материал по температурному полю в массиве расплавляемого битума при наложении вибраций, характерных для устройств пульсирующего горения. — Ил. 2. Библиогр. 3.

*УДК 62-501.224:681.3*

**Литвинец В.И., Рубахин В.Б., Назаров В.И. Оценка временной погрешности аппроксимации кривых ортогональным методом моментов.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, вып. 10, с. 95—98.

Предложен способ определения точности аппроксимации кривых по интегральному критерию временной погрешности с учетом ортогональной спектральной характеристики сигнала. Применение полученного критерия позволяет снизить объем вычислительных операций, обеспечивает высокую точность и сходимость исходной и аппроксимирующей функций. — Ил. 1. Библиогр. 4.

*УДК 621.1.016*

**К вопросу определения энтальпий воды и водяного пара по линии насыщения/ В.К. Судловский, Ю.В. Мулев, В.В. Кравец, В.В. Бобров.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, вып. 10, с. 98–101.

Выполнен анализ погрешностей определения энтальпий, приведены рассчитанные на ЭВМ значения частных производных воды и водяного пара на линии насыщения по давлениям и температурам. — Ил. 2. Табл. 2. Библиогр. 1.

*УДК 621.1.016*

**К вопросу измерения диэлектрической проницаемости влажного водяного пара/ В.К. Судловский, В.В. Кравец, Ю.В. Мулев, А.В. Бузо.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 101–104.

Приведено описание экспериментального стенда, емкостного преобразователя для измерения диэлектрической проницаемости влажного водяного пара, описана методика проведения эксперимента.

Выполнено сравнение полученных экспериментальных результатов с теоретическими расчетами. — Ил. 3. Библиогр. 4.

*УДК 66.096.5*

**Экспериментальное исследование десорбции в термосевдоожигенном слое / Л.В. Шатон, В.И. Чернышев и др., А.П. Валев и др.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 105–108.

Дается сопоставление экспериментальных и полученных в результате численного расчета на ЕС ЭВМ данных, касающихся структуры дисперсного потока цеолита в десорбере с термосевдоожигенным слоем. — Ил. 2. Библиогр. 1.

*УДК 658.26:621.039*

**Яковлев Б.В., Глюза А.Т. Аналитическая методика определения предельного, экономически допустимого расстояния теплоснабжения от АЭС.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1983, вып. 10, с. 109–112.

Разработана методика определения предельного экономически допустимого расстояния теплоснабжения от АЭС с представлением ряда зависимостей в виде аналитических и аппроксимационных формул. — Библиогр. 3.