

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

# НАУЧНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ СБОРНИК

Выпуск 9

Минск "Вышэйшая школа" 1982

УДК 620.9

НЗ4

Главный редактор

Ю.А.Малевиц, кандидат технических наук, доцент

Редакционный совет:

В.М.Бладыко, 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.Северяннин, Б.И.Фираго, Г.Н.Хартанович, Б.В.Яковлев

Ответственный за выпуск

В.П.Беляев

Рассматриваются вопросы экономичности и надежности производства электрической и тепловой энергии, ее распределения и потребления, автоматизации производственных технологических процессов и установок, внедрения и эксплуатации АСУ в энергетике республики; использование энергии на промышленных предприятиях; проектирование, исследование и внедрение современных электроприводов переменного и постоянного тока.

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

Н  $\frac{30300 - 029}{M304 (05) - 82}$  53-82 2301000000

© Издательство "Вышэйшая школа", 1982.

В.М.Прима, канд. техн. наук (БПИ)

ПРОИЗВОДСТВО И ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ  
ОТРАСЛЯМИ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА СССР

XXVI съезда определил в качестве главных задач развития народного хозяйства страны в одиннадцатой пятилетке всемерный рост эффективности общественного производства, улучшение качества промышленной продукции, усиление режима экономии. Успешное решение поставленных задач неразрывно связано с опережающим развитием электроэнергетики, неуклонным повышением уровня электрификации отраслей народного хозяйства и эффективности использования всех видов энергии, в том числе электрической. В свою очередь ускорение процесса электрификации страны играет первостепенную роль в коммунистическом строительстве, в осуществлении НТР, в дальнейшем экономическом и социальном развитии нашего общества. Достаточно отметить, что за последнее десятилетие производство электроэнергии в стране возросло почти на 600 млрд. кВт·ч.

Широкая программа дальнейшего развития электроэнергетики в одиннадцатой пятилетке предусматривает быстрый рост темпов производства электрической энергии за счет использования дешевых ресурсов, ввода новых мощностей электростанций на базе освоения энергоблоков 800 и 1200 тыс. кВт. Это позволит довести производство электроэнергии в 1985 г. до 1500 - 1600 млрд. кВт·ч [1].

Процесс неуклонного роста отечественной электроэнергетики сопровождается изменениями ее территориального размещения. Прежде всего осваиваются районы Сибири, Дальнего Востока, Средней Азии. На территории Сибири, например, сосредоточено более половины предполагаемых запасов угля, около 40% запасов природного газа, почти третья часть гидроэнергетических ресурсов и месторождений нефти страны [2]. Это создает благоприятные условия для размещения здесь основной доли энергетической базы и создания больших топливно-энергетических комплексов (ТЭК). Самым крупным из них является Канско-Ачинский ТЭК, который станет наиболее мощной базой развития отечественной электроэнергетики. В Канско-Ачинском угольном месторождении намечается сооружение сверхмощных

тепловых электростанций по 6,4 млн. кВт с использованием энергоблоков по 800 тыс. кВт. Общая мощность этого региона составит более 60 млн. кВт при ежегодном производстве электроэнергии примерно 400 млн. кВт·ч. Крупным регионом, в котором будет осуществляться строительство мощных тепловых электростанций с энергоблоками 500 тыс. кВт, является Экибастузский угольный бассейн. В ближайшее десятилетие здесь будет построен ряд электростанций общей мощностью 20 млн. кВт. На обширной территории нашей страны осуществляется освоение и других мощных ТЭК, позволяющих рационально использовать в народном хозяйстве топливно-энергетические ресурсы.

Для обеспечения планируемого производства и распределения электрической энергии по территории СССР ведется сооружение новых системообразующих линий электропередач, способных передать на значительные расстояния большие потоки мощностей. Перспективными в этом отношении окажутся линии электропередач постоянного и переменного тока сверхвысоких напряжений (1500 и 1150 кВ соответственно), которые будут использоваться для передачи электроэнергии из Сибири и Казахстана в европейскую часть страны. Быстрое развитие электрических сетей всех напряжений за последний период значительно расширило границы Единой энергетической системы (ЕЭС), которая охватывает уже территорию с населением более 210 млн. чел. Таким образом, созданная в стране мощная электроэнергетическая база позволила осуществить на более высоком научно-техническом уровне дальнейшую электрификацию народного хозяйства, повысить электровооруженность труда во всех его отраслях.

В одиннадцатой пятилетке наряду с увеличением темпов производства электроэнергии предусматривается и наиболее эффективное ее использование различными отраслями народного хозяйства страны.

Самым энергоемким потребителем в настоящее время остается промышленность, электропотребление в которой неуклонно увеличивается из года в год. За десять последних лет расход электроэнергии в промышленности возрос на 262 млрд. кВт·ч и составил в 1980 г. более половины общего электропотребления в стране. Столь большой объем электропотребления в промышленности обусловлен наращиванием ее энергоемких производств, внедрением технологических процессов, повышением уровня электровооруженности и производительности труда

Однако доля промышленного электропотребления в общем электробалансе страны постепенно уменьшается. Так, если в 1970 г. она составила около 60% общего потребления электроэнергии в стране, то к концу 1980 г. — 54%. Объясняется это тем, что за годы десятой пятилетки наиболее быстрыми темпами возрастало электропотребление сельскохозяйственным производством, коммунально-бытовым хозяйством крупных промышленных городов, и одновременно снижалась электроемкость некоторых видов промышленного производства.

Изменился за последние 10 — 15 лет характер электропотребления в промышленности. Повышение интенсивности промышленного производства, улучшение качества продукции, имевшие место в истекшей пятилетке, осуществлялись в основном за счет более эффективного использования электрической энергии в технологических процессах. Так, широкое применение электротермии позволило металлургии повысить качество выплавляемого металла. Использование электрофизических и электрохимических способов обработки материалов привело к уменьшению их расхода в машиностроении при одновременном улучшении качества изделий.

В текущем пятилетии всем отраслям промышленности предстоит решать более сложные задачи по дальнейшему повышению эффективности общественного производства на основе внутренних резервов и возможностей, предусматривающих экономное расходование энергоресурсов, а также использование новых прогрессивных технологических процессов производства, требующих значительного количества электрической энергии. В свете этих больших задач получают дальнейшее развитие вопросы рационального электроснабжения промышленных предприятий, снижения потерь электрической энергии, ее учета и экономии. Большое внимание будет уделено совершенствованию методов расчета электрических нагрузок и необходимой степени резервирования промышленных потребителей электроэнергии. В настоящее время имеется ряд отраслей промышленности, в том числе таких энергоемких, как металлургия, где основные элементы систем электроснабжения работают со значительной недогрузкой. Приведение в соответствие расчетной электрической нагрузки при проектировании систем электроснабжения таких предприятий с фактической их нагрузкой является важнейшим условием повышения эффективности систем электроснабжения.

Дальнейшее развитие получит при проектировании такое важное техническое направление, как сокращение протяженнос-

ти распределительных линий низшего напряжения систем электроснабжения за счет приближения высшего напряжения к основным группам электроприемников. Применение в этом случае подстанций глубокого ввода (110 – 220/6 – 10 кВ), выполненных со стороны высшего напряжения по упрощенным схемам, снизит затраты и сократит сроки их сооружения. Прогрессивным решением в условиях ограниченных производственных площадей может стать такое, при котором выполнение вводов и всей электрической сети (110 – 220 кВ) на территории промышленного предприятия осуществляется маслонаполненными кабелями соответствующих напряжений большой пропускной способности. Опыт сооружения и эксплуатации таких кабельных линий в отечественной практике электроснабжения уже имеется.

Развитие народного хозяйства страны во многом определяется успешным решением такой важной хозяйственной проблемы, как организация скоростных высокоэффективных транспортных связей. В настоящее время они в значительной мере обеспечиваются применением электрифицированного транспорта. Перевод, например, железнодорожного транспорта на электрическую тягу позволил повысить скорость движения, пропускную способность дорог и сократить расход топлива. Одновременно возросло и электропотребление на железнодорожном транспорте, которое в 1980 г. достигло почти 50 млрд. кВт·ч. В течение одиннадцатой пятилетки предусматривается электрифицировать 6 тыс. км железнодорожных путей. Таким образом, их протяженность в 1985 г. приблизится к 50 тыс. км.

Продолжает интенсивно развиваться городской электрифицированный транспорт, доля электропотребления которого составила в 1980 г. 8% от суммарного расхода электроэнергии на транспортные нужды. Развитие внутригородского транспорта будет осуществляться в основном за счет использования троллейбусов, скоростных трамваев и расширения строительства в крупных городах метрополитена, что потребует значительного расхода электроэнергии на транспортные нужды.

Из года в год растет электропотребление трубопроводным транспортом нефти, нефтепродуктов и газа, а также речным, морским и автомобильным транспортом, главным образом, в процессе выполнения погрузочно-разгрузочных работ.

В общем электробалансе страны важное место занимает электропотребление сельскохозяйственными потребителями. Современный этап их электрификации характеризуется завершением электроснабжения всего сельскохозяйственного производ-

ства, а также жилищно-коммунального хозяйства в сельской местности, осуществляемого от государственных электрических сетей. Высокие темпы роста электровооруженности труда в сельскохозяйственном производстве, широкая электрификация быта сельского населения приводят к резкому увеличению электропотребления этой категорией потребителей. Достаточно отметить, что за последние десятилетие оно возросло в 2,8 раза и достигло в 1980 г. 109 млрд. кВт·ч.

Современное механизированное сельскохозяйственное производство по насыщенности электрооборудованием и его сложности, по степени концентрации нагрузки и расхода электроэнергии приравнивается к предприятиям промышленности. Крупные животноводческие комплексы, широкое строительство которых развернуто в настоящее время, обуславливают электрическую нагрузку по 5 тыс. кВт. Каждый такой комплекс имеет установленную мощность трансформаторов более 8 тыс. кВт и по надежности электроснабжения относится к потребителям первой категории.

Наряду с электромеханизацией и автоматизацией технологических процессов в животноводстве электроэнергия находит применение в растениеводстве, теплично-парниковом хозяйстве, на зерноочистительных пунктах, объектах заготовки и переработки кормов и др.

Исключительно важную роль в социальном процессе сближения условий жизни в городе и деревне играет электрификация быта сельского населения. За истекшее пятилетие расход электроэнергии на коммунально-бытовые нужды в сельской местности составил четвертую часть общего электропотребления сельскохозяйственными потребителями.

Дальнейший рост материального благосостояния сельского населения, повышение уровня его культуры будет сопровождаться еще большим насыщением быта сельских жителей электроприборами различного назначения, в первую очередь, телевизорами, радиолами, холодильниками, стиральными машинами, пылесосами и др. В связи с этим к концу текущего пятилетия общее потребление электроэнергии в сельском хозяйстве предусматривается довести до 170 – 190 млрд. кВт·ч [3], что в 1,7 раза превысит этот показатель 1980 г. Быстрый рост электропотребления в сельской местности в одиннадцатой пятилетке приведет к необходимости решения новых более сложных задач в электроснабжении сельскохозяйственных потребителей, развитии сельских электрических сетей, улучшении их эксплуа-

тации и повышении надежности электроснабжения. С увеличением плотности нагрузок, появлением энергоемких потребителей в сельскохозяйственном производстве возрастут объемы электросетевого строительства, а также количество подстанций напряжением 110/10 кВ.

Однако уже в настоящее время вследствие недостаточно надежной работы воздушных линий сельских электрических сетей, имеющих большую разветвленность, возникают серьезные затруднения в практике электроснабжения сельскохозяйственных потребителей. В целях дальнейшего повышения надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей следует ожидать использования замкнутых схем в электрических сетях, автоматизации их работы путем оснащения средствами АПВ и АВР, а также постепенной реконструкции и замены воздушных линий кабельными.

Быстрые темпы развития отечественной электроэнергетики позволяют использовать все большее количество электроэнергии на коммунально-бытовые нужды населения. Так, суммарный расход электроэнергии коммунально-бытовыми потребителями городов увеличился за истекшее десятилетие в два раза и составил в 1980 г. 155 млрд. кВт·ч [4]. Электропотребление на одного городского жителя к концу этого периода достигло 922 кВт·ч в год, или увеличилось в 1,56 раза.

В одиннадцатой пятилетке получит широкий размах жилищное строительство. При этом будет улучшаться планировка квартир и условия их эксплуатации. Предусматривается построить в 1981 – 1985 гг. жилые дома общей площадью 530–540 млн. м<sup>2</sup>. Повышение жизненного уровня городского населения и в дальнейшем будет сопровождаться стремлением к бытовому комфорту. Последний в свою очередь во многом определяется уровнем электрификации быта, электромеханизации различных домашних работ, электрообогрева и электроосвещения. В связи с этим к концу текущей пятилетки электропотребление на одного городского жителя составит в среднем 1200 – 1300 кВт·ч в год. Сравнительно большое удельное электропотребление населением городов обуславливается широким использованием в быту различных электроприборов. В ближайшие годы существенно возрастут мощности отдельных электробытовых приборов, что приведет к совершенствованию технологических процессов, их ускорению, улучшению санитарно-гигиенических условий в квартирах. Намечается тенденция к разработке электроприборов с программным управлением, а также пере-

ход к производству комплексов бытового электрооборудования для кухонь, обработки белья и одежды, уборки помещения и др. С учетом санитарно-гигиенических преимуществ стационарных электроплит все большее применение будет находить электроэнергия для приготовления пищи. Уже в 1980 г. расход электроэнергии для этой цели в жилом секторе достиг 5,3 млрд. кВт·ч.

Значительное количество электроэнергии расходуется общегородскими коммунальными потребителями (водопровод, канализация, освещение улиц, пассажирский транспорт), а также сферой обслуживания (торговля, общественное питание, культурно-бытовые услуги, здравоохранение) и др.

Широкая электрификация быта городского населения создает ряд технических проблем при электроснабжении жилищно-коммунального сектора современного города и требует нового подхода к их решению. Насыщение квартир электробытовыми приборами, увеличение их установленной мощности привели к необходимости уточнения методов определения уровней электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей.

В последнее время выполнено ряд исследований в области расчетов электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей с использованием положений теории вероятностей и математической статистики. Это позволило создать теоретическую основу для более точного определения и прогнозирования электропотребления в жилищно-коммунальном секторе городов.

Вместе с увеличением размеров города и его электрических нагрузок растут уровни напряжений, при которых необходимо передавать городским потребителям основные потоки мощности. Прогрессивным решением здесь является ввод напряжения 220 кВ непосредственно в центральные районы города с помощью высоковольтных линий, выполненных маслонаполненными кабелями высокого давления. Приближение высокого напряжения к потребителям позволит осуществить подключение распределительных сетей (10 кВ) непосредственно к сборным шинам вторичного напряжения подстанций глубокого ввода и сократить протяженность кабельных линий этих сетей.

В связи с необходимостью повышения надежности электроснабжения городов потребуются в дальнейшем максимальная автоматизация их распределительных сетей среднего напряжения.

Таким образом, электрификация промышленного, сельскохозяйственного производств, транспорта, а также жилищно-коммунального сектора городов и сел, которая получит свое даль-

нейшее развитие в одиннадцатой пятилетке, позволит интенсифицировать производственные процессы, повысить производительность и электровооруженность труда, создать более высокий уровень условий жизни для населения страны.

#### Л и т е р а т у р а

1. Основные направления экономического и социального развития СССР на 1981 - 1985 годы и на период до 1990 года. - М.: Политиздат, 1981. - 95 с.
2. Попырин Л.С., Савельев В.А., Славин Г.Б. Энергетика Сибири в десятой пятилетке. - Изв. вузов. Энергетика, 1976, №11, с.3 - 8.
3. Непорожний П.С. Ленинскому плану ГОЭЛРО - 60 лет. - Электрические станции, 1980, №12, с.2 - 7.
4. Некрасов А.М., Хохлов В.А. Электроэнергетика в десятой пятилетке. - Изв. вузов. Энергетика, 1976, с. 3 - 12.

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.316.14

В.Т.Федин, канд. техн. наук (БПИ), П.В.Лычев, аспирант (ГПИ)

### ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ КРИОГЕННЫХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

В настоящее время установившимся считается мнение, что для сверхпроводящих кабелей переменного тока наиболее предпочтительна коаксиальная конструкция [1]. Исследование различных схем включения таких кабелей в электропередачу [2,3] указывает на относительно высокую стоимость передачи единицы электроэнергии.

С целью повышения экономичности передачи электроэнергии по сверхпроводящим кабелям переменного тока нами разработана схема электропередачи, сочетающая одновременную передачу энергии переменным и постоянным током.

Один из вариантов схемы представлен на рис. 1. Схема выполнена на основе сверхпроводящего кабеля с коаксиальными

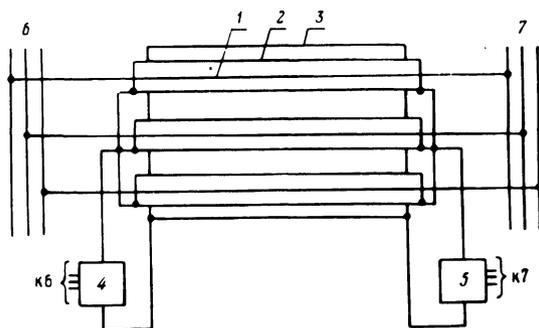


Рис. 1. Схема электропередачи.

внутренними 1 и внешними 2 проводниками, который снабжен дополнительным охватывающим проводником 3. Внутренний и внешний проводники коаксиала разделены хладагентом, используемым одновременно в качестве электроизоляции. Охлаждение дополнительного проводника производится обратным потоком хладагента, циркулирующим в пространстве между самим

проводником и кожухом холодной зоны. В электропередачу, кроме описанного кабеля, входят преобразовательные установки выпрямительной 4 и инверторной 5 подстанций, системы шин источника питания 6 и нагрузки 7.

Электрическая цепь для передачи электроэнергии переменным током создается внутренними проводниками коаксиалов. Внешние проводники коаксиалов экранируют магнитное поле внутренних проводников и, собранные в нейтраль по обоим концам, подключены к одному из полюсов преобразовательных подстанций. Другой полюс подстанций подключен к сверхпроводящему проводнику 3. Вместе они составляют электрическую цепь для передачи потоянного тока.

Для коаксиальных кабелей переменного тока при заданных расчетных параметрах (мощность, напряжение) диаметры проводников, выполненных жестким сверхпроводником второго рода, определяются согласно алгоритму, приведенному в [4].

Найдем величину постоянного тока, которым можно догрузить внешний проводник коаксиала диаметром  $d_{2\text{опт}}$ , выбранный на мощность переменного тока  $P_{\text{пер}}$ , при условии, что результирующая напряженность магнитного поля не превысит заданную  $H_p$ .

Напряженность магнитного поля, создаваемая мощностью переменного тока, равна

$$H_{\text{пер}} = \frac{\sqrt{2} P_{\text{пер}}}{\sqrt{3} \pi \cdot U_{\text{пер}} \cdot d_{2\text{опт}} \cdot \cos \varphi},$$

где  $U_{\text{пер}}$  - линейное напряжение переменного тока.

Напряженность поля, которая может быть создана постоянным током,

$$H_{\text{пост}} = H_p - H_{\text{пер}}.$$

В результате найдем величину постоянного тока

$$I_{\text{пост}} = \frac{\pi \cdot d_{2\text{опт}} \cdot H_{\text{пост}}}{k_3}$$

или мощность

$$P_{\text{пост}} = \frac{\pi \cdot d_{2\text{опт}} \cdot H_{\text{пост}} \cdot U_{\text{пост}}}{k_3},$$

где  $k_3$  - коэффициент запаса;  $U_{\text{пост}}$  - напряжение постоянного тока между полюсами.

Значения величин постоянного тока для свехпроводящих кабелей из станнида ниобия  $Nb_3Sn$ , диаметры проводников которых выбраны из условия передачи мощности переменного тока при напряжении  $U_{\text{пер}} = 110$  кВ, для коэффициента  $k_3 = 4$  и  $H_p = 5$  кА/см приведены в табл. 1.

Дополнительная загрузка проводника постоянным током увеличивает индукцию магнитного поля на поверхности его и глубину ее проникновения в сверхпроводник. В соответствии с [5] толщина сверхпроводника, на которую проникает магнитное поле, равна

$$\delta = \int_0^B \frac{dB}{\mu_0 \cdot j_k(B)}, \quad (1)$$

где  $B$  - расчетная индукция на поверхности проводника;  $j_k(B)$  - критическая плотность тока при расчетной индукции  $B$ . Зависимость критической плотности тока от напряженности магнитного поля может быть представлена в следующем виде [4]:

$$j_k = j_{k0} \sqrt{\frac{H_*}{H_p}}, \quad (2)$$

где  $j_{k0}$  - критическая плотность тока при напряженности поля  $H_*$ .

Таблица 1.

Величины дополнительной загрузки внешних проводников коаксиала

Расчетный параметр	Мощность, передаваемая на переменном токе, МВт			
	1000	2000	3000	5000
$d_{1\text{опт}}, \text{см}$	3,3	5,4	7,4	11,5
$d_{2\text{опт}}, \text{см}$	7,3	9,4	11,4	15,5
$I_{\text{пост}}, \text{кА}$	80	100	117	150

Так как в полях между первым и вторым критическими  $H_p = \frac{B}{\mu_0} - H_{к1}$ , выражение (1) с учетом (2) запишется так:

$$\delta = \frac{(H_p - H_{к1}) \sqrt{H_p}}{j_{к0} \cdot \sqrt{H_{к1}}}$$

Возможное увеличение необходимой тошины сверхпроводника с ростом расчетной напряженности магнитного поля должно быть учтено при проектировании кабелей и проведении технико-экономических исследований.

Дополнительная передача электроэнергии постоянным током по кабелю переменного тока экономически целесообразна, если стоимость одновременной передачи единицы электроэнергии  $c_{одн}$  будет меньше соответствующей стоимости передачи энергии переменным током  $c_{пер}$

$$c_{одн} < c_{пер}$$

Перейдя к приведенным затратам, получим

$$Z_{одн} < Z_{пер}$$

Приведенные затраты на электропередачу переменного тока представим в виде

$$Z_{пер} = K_{спк} (r_n + r_{э1}) + K_{п/ст} (r_n + r_{э2}) + \Delta \mathcal{E} \cdot \beta,$$

где  $K_{спк}$  – капитальные вложения в сверхпроводящий кабель;  $K_{п/ст}$  – капитальные вложения в оборудование подстанций (трансформаторы, выключатели, источники реактивной мощности);  $r_n, r_{э1}$  – нормы отчислений на эксплуатацию соответственно СПК и электрооборудования подстанций;  $r_{э2}$  – нормы отчислений на эксплуатацию источников реактивной мощности;  $\Delta \mathcal{E}$  – потери электроэнергии в электропередаче;  $\beta$  – стоимость 1 кВт·ч потерь электроэнергии.

Аналогично затраты на одновременную передачу энергии переменным и постоянным током

$$Z_{одн} = K_{спк}^{одн} (r_n + r_{э1}) + (K_{п/ст}^{одн} + K_{пп}) \cdot (r_n + r_{э2}) + \Delta \mathcal{E}_{одн} \cdot \beta,$$

где  $K_{пп}$  – капитальные вложения в преобразовательные подстанции (трансформаторы, преобразователи, источники реактивной мощности).

Нами проведена укрупненная оценка экономической эффективности одновременной передачи электроэнергии переменным и постоянным током на примере электропередачи длиной 100 км напряжением переменного тока 110кВ и постоянного тока 20кВ. Результаты расчета приведены в табл. 2, из которой видны экономические преимущества одновременной передачи энергии переменным и постоянным током по общему кабелю. Стоимость передачи 1 кВт·ч электроэнергии по нему на 20 - 25% ниже, чем на переменном токе.

Таблица 2.

Сравнительные технико-экономические характеристики

Расчетный параметр	Передаваемая мощность, МВт			
	2000	3000	4000	5000
$K_{\text{спк}}, \text{т.руб.}$	42500	59400	77000	96800
$K_{\text{п/ст}}, \text{т.руб.}$	12400	19060	24820	31510
$\Delta \mathcal{E} \cdot \beta, \text{т.руб.}$	5580	6950	8160	9530
$Z_{\text{пер}}, \text{т.руб.}$	16532	22742	28524	35192
$\mathcal{E} \cdot 10^6, \text{МВт} \cdot \text{ч}$	14	21	28	35
$c_{\text{пер}}, \frac{\text{коп}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$	0,121	0,108	0,102	0,100
$P_{\text{пер}}, \text{МВт}$	800	1200	2000	2800
$P_{\text{пост}}, \text{МВт}$	1200	1800	2000	2200
$K_{\text{спк}}, \text{т.руб.}$	38400	43200	51100	65400
$K_{\text{п/ст}}, \text{т.руб.}$	4960	7460	12420	14980
$K_{\text{пп}}, \text{т.руб.}$	6980	10540	11600	12760
$\Delta \mathcal{E} \cdot \beta, \text{т.руб.}$	4810	5780	6880	7490
$Z_{\text{одн}}, \text{т.руб.}$	14874	18020	21902	26118
$c_{\text{одн}}, \frac{\text{коп}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$	0,106	0,086	0,078	0,075

Исходные технико-экономические показатели, использованные при расчете, брались из [6].

## Л и т е р а т у р а

1. Веников В.А., Зуев Э.Н. Криогенные кабельные линии. – В кн.: Электротехнические материалы, электрические конденсаторы, провода и кабели, т. 9. Сверхпроводимость и ее применения. – М.: ВИНТИ, 1977, с. 71 – 152. 2. Белянчев Ю.В. Исследование и оптимизация конструктивных и режимных параметров криогенных ЛЭП переменного тока: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Минск, 1976. – 18 с. 3. Савельев А.Я. Исследование технико-экономических характеристик СП ЛЭП на базе экономико-математической модели: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: ЭНИН, 1979. – 20 с. 4. Федин В.Т., Белянчев Ю.В. Выбор целесообразного проводникового материала для сверхпроводящих ЛЭП. – Изв. вузов. Энергетика, 1979, №6, с.88–91. 5. Бухольц М., Давыдов А.Е., Зуев Э.Н. Некоторые вопросы проектирования СП ЛЭП переменного тока. – В сб.: Труды конференции по техническому использованию сверхпроводимости, т.3. Сверхпроводящие электрические машины и линии электропередачи. М.: Атомиздат, 1977, с.119 – 124. 6. Справочник по проектированию электроэнергетических систем/Под ред. С.С.Рокотяна, И.М.Шапиро. – М.: Энергия, 1977. – 288 с.

УДК 621.316

М.А.Короткевич, канд.техн.наук, М.И.Травянский,  
инженер (Ставропольэнерго)

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МНОЖИТЕЛЕЙ ЛАГРАНЖА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСХОДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Приведенные затраты на передачу электроэнергии ( $Z$ ) состоят из годовых эксплуатационных расходов ( $I$ ) и затрат по вероятным ущербам от недоотпуска электроэнергии потребителям при аварийных  $Y_a$  и плановых  $Y_p$  ремонтах сети и снижении качества электроэнергии  $Y_k$ , а также стоимости прибавочного продукта, созданного трудом электросетевого персонала ( $p_n, K$ ), т.е.

$$Z = p_n K + I + Y_p + Y_a + Y_k. \quad (1)$$

Издержки  $I$  в свою очередь состоят из затрат на проведение капитальных ремонтов ( $I_K$ ), текущих ремонтов и обслуживающие сети ( $I_O$ ) и стоимости потерянной электроэнергии ( $\Delta \mathcal{E}\beta$ ). Соотношение между указанными составляющими установлено нормативно [1]. На практике, зачастую, наблюдается несоответствие между фактическими расходами и расходами, определенными по [1].

В связи с этим представляется целесообразным рассмотрение задачи рационального распределения средств ремонтно-эксплуатационного обслуживания между указанными составляющими расходов.

Увеличение средств на проведение капитальных ремонтов на величину  $\Delta I_K$  приводит к увеличению  $p_K$  до значения  $p_K (K + \Delta I_K)$ , увеличению стоимости потерянной электроэнергии в связи с необходимостью питания части потребителей по ремонтной схеме, увеличению ущербов от плановых отключений и снижения качества электроэнергии. Вероятность аварийных отключений потребителей при этом снижается. Аналогичные рассуждения характерны и при увеличении средств на проведение текущих ремонтов и обслуживание сети (за исключением расходов  $p_K$ ).

Таким образом, величины  $p_K$ ,  $I_K$ ,  $I_O$ ,  $\Delta \mathcal{E}\beta$ ,  $Y_a$ ,  $Y_p$  прямо пропорциональны изменению  $I_K$  и  $I_O$ , а величина  $Y_a$  - обратно пропорциональна.

Тогда формулу (1) можно записать в виде

$$Z = p_K (I_K) + Y_a \left( \frac{1}{I_K, I_O} \right) + I_K + I_O + \Delta \mathcal{E}\beta (I_K, I_O) + Y_p (I_K, I_O) + Y_k (I_K, I_O). \quad (2)$$

Для нахождения рациональных значений  $I_K$  и  $I_O$  воспользуемся условием ограничения

$$I = I_K + I_O. \quad (3)$$

Функция Лагранжа будет иметь вид

$$F = p_K (I_K) + I_K + I_O + \Delta \mathcal{E}\beta (I_K, I_O) + Y_p (I_K, I_O) + Y_a \left( \frac{1}{I_K, I_O} \right) - \lambda (I_K + I_O - I), \quad (4)$$

где  $\lambda$  - неопределенный множитель Лагранжа.

Составим систему уравнений  $\frac{dF}{dI_K} = 0$  и  $\frac{dF}{dI_0} = 0$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{dF}{dI_K} &= p_H + 1 + \alpha_{\ominus} + \alpha_{\Pi} + \alpha_K - \frac{\alpha_a}{I_K^2} - \lambda = 0; \\ \frac{dF}{dI_0} &= 1 + \alpha'_{\ominus} + \alpha'_{\Pi} + \alpha'_K - \frac{\alpha'_a}{I_0^2} - \lambda = 0, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $\alpha_{\ominus}$ ,  $\alpha_{\Pi}$ ,  $\alpha_K$ ,  $\alpha_a$  - доля изменения составляющих стоимости потерь электроэнергии, ущербов от недоотпуска электроэнергии потребителям при плановых, аварийных отключениях и снижений качества энергии при изменении величины  $I_K$ ;  $\alpha'_{\ominus}$ ,  $\alpha'_{\Pi}$ ,  $\alpha'_K$ ,  $\alpha'_a$  - то же самое, но при изменении величины  $I_0$ .

Из системы уравнений (5) находим, что

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= A - \frac{\alpha_a}{I_K^2}; \\ \lambda &= B - \frac{\alpha'_a}{I_0^2}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $A = 1 + p_H + \alpha_{\ominus} + \alpha_{\Pi} + \alpha_K$ ;

$B = 1 + \alpha'_{\ominus} + \alpha'_{\Pi} + \alpha'_K$ .

Из уравнения (6) следует, что

$$I_K = \sqrt{\frac{\alpha_a}{(A-B) + \frac{\alpha'_a}{I_0^2}}}. \quad (7)$$

Подставив значение уравнения (7) в уравнение (3), получим

$$И = И_0 + \sqrt{\frac{\alpha_a}{(A-B) + \frac{\alpha'_a}{И_0^2}}}$$

Откуда

$$И_0^4(A-B) - И_0^3 2И(A-B) + И_0^2 [И^2(A-B) + \alpha'_a - \alpha_a] - И_0 2И \alpha'_a + И^2 \alpha'_a = 0$$

или

$$И_0^4 - И_0^3 2И + И_0^2 \left[ И^2 + \frac{\alpha'_a - \alpha_a}{A - B} \right] - И_0 \frac{2И \alpha'_a}{A - B} + \frac{И^2 \alpha'_a}{A - B} = 0.$$

Введем новые обозначения:

$$-2И = a; И^2 + \frac{\alpha'_a - \alpha_a}{A - B} = b; -\frac{2И \alpha'_a}{A - B} = c; \frac{И^2 \alpha'_a}{A - B} = d.$$

$$\text{Тогда } И_0^4 + aИ_0^3 + bИ_0^2 + cИ_0 + d = 0. \quad (8)$$

В соответствии с решением Декарта-Эйлера уравнение (8) следует привести путем подстановки  $И_0 = y - \frac{a}{4}$  к неполному виду [2]:

$$y^4 + py^2 + qy + r = 0, \quad (9)$$

$$\text{где } p = b - \frac{3a^2}{8}; q = c - \frac{ab}{2} + \frac{1}{8}a^3; r = d - \frac{ca}{4} + \frac{a^2b}{16} - \frac{3a^4}{256}.$$

Корни  $y_1, y_2, y_3, y_4$  "неполного" уравнения четвертой степени (9) равны одному из выражений

$$\pm \sqrt{z_1} \pm \sqrt{z_2} \pm \sqrt{z_3}, \quad (10)$$

в которых сочетания знаков выбираются так, чтобы удовлетворялось условие

$$\sqrt{z_1} \sqrt{z_2} \sqrt{z_3} = -\frac{q}{8}, \quad (11)$$

причем  $z_1, z_2, z_3$  - корни кубического уравнения

$$z^3 + \frac{p}{2} z^2 + \frac{p^2 - 4r}{16} z - \frac{q^2}{64} = 0. \quad (12)$$

В свою очередь это уравнение в соответствии с правилом Кардано решается следующим образом: подстановкой  $z = x - \frac{p}{6}$  уравнение (12) приводится к неполному виду

$$x^3 + xk + m = 0, \quad (13)$$

где  $k = \frac{p^2 - 4r}{16} - \frac{p^4}{12}$ ;  $m = \frac{p^6}{108} - \frac{q^2}{64} - \frac{p^4}{96} + \frac{pr}{24}$ .

Корни  $x_1, x_2, x_3$  "неполного" кубического уравнения (13) равны:

$$\begin{aligned} x_1 &= (\nu + \omega)^3 = \sqrt[3]{-\frac{m}{2} + \sqrt{\left(\frac{k}{3}\right)^3 + \left(\frac{m}{2}\right)^2}} + \\ &+ \sqrt[3]{-\frac{m}{2} - \sqrt{\left(\frac{k}{3}\right)^3 + \left(\frac{m}{2}\right)^2}} = \\ &= \sqrt[3]{\left(\frac{q^2}{128} + \frac{p^4}{192} - \frac{pr}{48} - \frac{p^6}{216}\right) + \sqrt{\left(\frac{p^2 - 4r}{48} - \frac{p^4}{36}\right)^3}} + \\ &+ \sqrt[3]{\left(-\frac{q^2}{128} - \frac{p^4}{192} + \frac{pr}{48} + \frac{p^6}{216}\right)^2} + \\ &+ \sqrt[3]{\left(\frac{q^2}{128} + \frac{p^4}{192} - \frac{pr}{48} - \frac{p^6}{216}\right) - \sqrt{\left(\frac{p^2 - 4r}{48} - \frac{p^4}{36}\right)^3}} + \\ &+ \sqrt[3]{\left(-\frac{q^2}{128} - \frac{p^4}{192} + \frac{pr}{48} + \frac{p^6}{216}\right)^2}; \\ x_2 &= \frac{\nu - \omega}{2} + j \frac{\nu - \omega}{2} \sqrt{3}; \end{aligned}$$

$$x_3 = -\frac{\nu + \omega}{2} - j \frac{\nu - \omega}{2} \sqrt{3} .$$

$$\text{Тогда } z_1 = x_1 - \frac{p^2}{6} ; z_2 = x_2 - \frac{p^2}{6} ; z_3 = x_3 - \frac{p^2}{6} .$$

В качестве  $\nu$  и  $\omega$  берутся любые значения кубических корней из соответствующих комплексных чисел, удовлетворяющие соотношению

$$\nu \omega = -\frac{k}{3} = -\frac{p^2 - 4r}{48} + \frac{p^4}{36} = \frac{p^4}{36} - \frac{p^2 - 4r}{48} .$$

Последовательно решая уравнения (13) и (9), находим значение  $I_{\text{Опт}}$ , т.е. оптимальное значение расходов на проведение текущего ремонта и обслуживание сети

$$I_{\text{к опт}} = I - I_{\text{Опт}} .$$

#### Л и т е р а т у р а

1. Электротехнический справочник. - М.: Энергия, 1975, т.3. - 587 с. 2. Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике. - М.: Наука, 1974. - 880 с.

УДК 621.311.1

Л.П.Падалко, канд.техн.наук, В.Н.Нагорнов, инженер (БПИ)

#### ПРОБЛЕМЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТИ ГРАФИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Проблема выявления рациональных путей покрытия переменной части графика электрической нагрузки обусловлена как экономическими, так и техническими аспектами развития электроэнергетики. Экономическая сторона объясняется различием стоимостных характеристик источников разного типа, изменением структуры топливного баланса, требующего все большего использования для нужд энергетики ядерного топлива. Кроме того, многие экономические показатели электростанций зависят также и от режима их использования.

Требования технического характера обуславливаются неравномерным режимом электропотребления, предъявляющим повышенные требования к маневренным свойствам оборудования: скорости набора и сброса нагрузки, глубине разгрузки. Данные требования не могут быть в полной мере удовлетворены только за счет оборудования мощных КЭС или АЭС. Недостаток маневренных источников в энергосистеме вызывает вынужденную работу базового оборудования в переменной части графика нагрузки. Это приводит к повышенному износу оборудования, снижению надежности и экономичности. Перенасыщение энергосистем базовыми генерирующими источниками уже на сегодня ставит вопрос о целесообразности использования оборудования ТЭЦ в полупиковом режиме.

Таким образом проблема рационального покрытия переменной части графика нагрузки заключается не только в выборе оптимального режима работы эксплуатируемого оборудования, но и в формировании оптимальной структуры генерирующих источников на перспективный период. Рассмотрим экономико-математическую модель поставленной задачи, сформулированную на основе позионной оптимизации [1]. В этой модели суточный график нагрузки ЭЭС эквивалентируется в виде определенного количества зон, которые охватывают всю площадь этого графика. Каждая зона графика характеризуется определенной нагрузкой и числом часов ее использования. В практических задачах достаточная точность может быть получена при разбивке графика на 4 - 6 зон, каждой из оптимизируемых мощностей генерирующих источников предоставляется право работать в любой зоне графика нагрузки, за исключением тех зон, в которых имеются ограничения по техническим условиям. Предполагается, что внутри каждой из зон графика все оптимизируемые энергоустановки эксплуатируются в режиме, отвечающем параметрам данной зоны графика нагрузки. Показатели удельных затрат оптимизируемых электростанций в разных зонах графика ЭЭС принимаются дифференцированными.

Применительно к статической постановке задачи целевая функция может быть записана в виде

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min,$$

где  $x_{ij}$  - мощность  $i$ -й станции в  $j$ -й зоне графика нагрузки;  $c_{ij}$  - удельные затраты по  $i$ -й станции в  $j$ -й зоне на единицу мощности.

Для действующих электростанций  $x_{ij}$  означает их рабочую мощность, а  $c_{ij}$  – удельные затраты топлива на единицу мощности в денежном измерении. Для данного случая  $c_{ij}$  определяется

$$c_{ij} = z_{Ti} b_{ij} h_{ij},$$

где  $z_{Ti}$  – замыкающие затраты на топливо, сжигаемого на  $i$ -й электростанции;  $b_{ij}$  – показатель удельных затрат на топливо;  $h_{ij}$  – число часов использования  $i$ -й электростанции в  $j$ -й зоне. Для вновь сооружаемых электростанций  $x_{ij}$  означает вводимую мощность электростанции, которая будет использоваться в  $j$ -й зоне. Показатель  $c_{ij}$  в данном случае выражает удельные приведенные затраты на единицу вновь вводимой мощности и определяется так:

$$c_{ij} = (E_n + p)k_i + z_{Ti} b_{ij} h_{ij},$$

где  $p$  – коэффициент, учитывающий отчисления на амортизацию и обслуживание;  $k_i$  – удельные капиталовложения в  $i$ -й генерирующий источник.

В составе ограничений задачи прежде всего следует учесть условие выполнения баланса мощности, записываемое в виде:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \geq P_{\max}$$

Ограничение по балансу энергии может быть представлено так:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} h_{ij} \geq \Theta_{\text{год}}$$

В математической модели могут быть в принципе учтены ограничения, диктуемые техническими соображениями по каждому типу генерирующих источников. К числу таковых относятся, например, ограничения по располагаемой мощности действующих источников, по предельной мощности вновь сооружаемой электростанции, различные ограничения режимного характера и т.д.

В вышеприведенной модели было записано предположение, что годовой режим электропотребления представляется одним характерным суточным графиком нагрузки. Для приближения предлагаемой модели к реальным условиям необходимо более полное представление годового режима электропотребления. Это требует введения не одного, а нескольких характерных суточ-

ных графиков нагрузки. Таковыми могут быть, например, графики рабочих, субботних и воскресных суток, взятые для каждого месяца, квартала или сезона. Данное обстоятельство вносит существенные осложнения в модель, однако делает ее более адекватной фактическому режиму электропотребления. Рассмотрим принципы математической формулировки приведенной выше математической модели с учетом указанных условий. Предположим, что модель формулируется для месячного периода, представляемого с помощью трех характерных суточных графиков. Обозначим число соответствующих суток через  $n_p$ ,  $n_c$ ,  $n_B$ , тогда целевая функция запишется:

$$Z = \sum_{l=1}^3 K_l \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ijl} x_{ijl} \rightarrow \min,$$

где  $x_{ijl}$  - мощность  $i$ -й станции в  $j$ -й зоне для  $l$ -го характерного графика;  $K_l$  - количество рабочих, субботних и воскресных суток в рассматриваемом месяце.

Условия по балансу мощности и энергии для характерных суток

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m x_{ijl} \geq P_l;$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ijl} h_{ijl} \geq \Theta_l, \quad l = \overline{1, 3}.$$

Предполагая, что мощности электростанций в режимных зонах рабочих суток будут всегда выше мощностей, получаемых для тех же зон субботних и воскресных суток, коэффициенты целевой функции  $c_{ijl}$  для разных типов суток будут определяться по-разному. Поскольку мощности вновь вводимых электростанций будут определяться величинами  $x_{ijl}$  для рабочих суток в коэффициентах  $c_{ijl}$ , для них должны быть учтены капитальные затраты и соответственно отчисления на амортизацию и обслуживание. Коэффициенты  $c_{ijl}$  для воскресных и субботних суток включают в себя только затраты на топливо. Способы формирования этих коэффициентов были описаны ранее.

Если предположить, что нагрузка энергопотребления непрерывно растет из года в год, то даже при неизменной неравномерности суточного режима электропотребления (либо даже при небольшом уменьшении переменной части графика нагруз-

ки) необходимость в пиковой, полупиковой и базовой мощности будет возрастать. Отсюда следует, что оптимум задачи в динамической постановке будет равен сумме оптимумов для статической постановки. В противном случае, т.е. когда темпы снижения пиковости будут превышать темпы роста нагрузки, сумма частных оптимумов не будет соответствовать динамическому оптимуму. В данной ситуации оказывается необходимой динамическая формулировка задачи.

Целевая функция динамической модели для случая представления годового режима в виде одного суточного графика может быть представлена

$$\begin{aligned}
 Z = E_H \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m (k_{i\Delta} x_{it} + p_i k_i (x_{i0} + \sum_{s=1}^{t-1} \Delta x_{is})) + \\
 + \sum_{i=1}^n b_{ijt} x_{ijt} h_{ijt} \delta_t + \sum_{i=1}^m p_i k_i (x_{i0} + \sum_{s=1}^{t-1} \Delta x_{is}) + \\
 + \sum_{j=1}^n b_{ijt} x_{ijt} h_{ijt} .
 \end{aligned}$$

Ограничения задачи

$$\begin{aligned}
 \sum_{j=1}^n x_{ijt} = x_{i0} + \sum_{s=1}^{t-1} \Delta x_{is}; \\
 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ijt} = P_t, \quad t = \overline{1, T}; \\
 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ijt} h_{ijt} \geq \Theta_t,
 \end{aligned}$$

где  $\Delta x_{ijt}$  - мощность, вводимая на  $i$ -й электростанции в  $t$ -м году;  $x_{ijt}$  - мощность  $i$ -й электростанции, учитывающая в  $j$ -й режимной зоне в  $t$ -м году.

В данной модели мощность участия рассматриваемых генерирующих источников в любой зоне графика нагрузки энергосистемы и число часов использования мощности на каждом интервале развития ЭЭС являются независимыми переменными. Поэтому режим работы всех электростанций может оптимизироваться в модели в любой год развития ЭЭС независимо от

того, в каком режиме работала данная электростанция в предшествующие годы.

На основе рассмотренных моделей с помощью ЭВМ ЕС-1030 был проделан комплекс расчетов по выявлению оптимальной структуры генерирующих мощностей для Белорусской и Ленинградской энергосистем. При уровне замыкающих затрат на мазут 40 - 45 руб/т.у.т., уголь 35 - 38 руб/т.у.т. и цене ядерного топлива 8 - 11 руб/т.у.т. была выявлена экономическая целесообразность перевода части эксплуатируемых КЭС и ТЭС на органическом топливе в полупиковый режим. Расчеты также подтвердили необходимость первоочередного ввода АКЭС, АТЭС по отношению к электростанциям на органическом топливе.

### Л и т е р а т у р а

1. Шарыгин В.С. Линейная математическая модель по выбору структуры энергосистемы с усовершенствованным учетом режима. - Экономика и математические методы, 1973, т. 1X, №1, с. 122 - 130. 2. Падалко Л.П. Критерии и методы оптимального управления электроэнергетической системой. - Минск: Наука и техника, 1979. - 200 с.

УДК 621.316.1.027.5.019.3

А.П.Крысенко, инженер (БО ЭСП)

### ВЫБОР ОБЪЕМА, ОЧЕРЕДНОСТИ И МЕСТ УСТАНОВКИ УСТРОЙСТВ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Надежность электроснабжения сельских потребителей не отвечает уровню современного сельскохозяйственного производства, характеризующегося комплексной электромеханизацией и автоматизацией технологических процессов. Одним из основных способов повышения надежности электроснабжения, не требующих существенной реконструкции распределительной сети, является оснащение ее противоаварийной автоматикой - устройствами автоматического секционирования (УС), пунктами автоматического ввода резерва (АВР), а также сооружение резервных связей (РС) между линиями, обеспечивающее повышение эффективности автоматики. Осуществление автоматизации в широком масштабе требует разработки планов автома-

тизации распределительной сети в каждом РЭС (районе электрических сетей) [1]. Предназначенная для этого инженерная методика должна обеспечивать с учетом неполноты исходной информации принятие экономически обоснованных решений по повышению надежности электроснабжения потребителей II и III категории.

Оптимальному варианту автоматизации сети РЭС соответствует максимум годового экономического эффекта, определяемого по выражению:

$$\mathcal{E} = y_0 \sum_i^M \Delta W_{ли} - \sum_{ус}^3 z_{ус} \sum_i^M n_i - \sum_{авр}^R z_{авр} \sum_i^R \Delta W_{ли} = \lambda \sum_i^M L_i P_i T_{ли} K_{ai}, \quad (1)$$

где  $y_0$  - удельный ущерб от недоотпуска электроэнергии;  $M$ ,  $n$ ,  $R$  - количество распределительных линий в РЭС, УС на линии и намечаемых пунктов АВР;  $z_{ус}$ ,  $z_{авр}$  - приведенные затраты на установку УС и на устройство АВР (с учетом сооружения РС, если это необходимо);  $\Delta W_{ли}$  - снижение недоотпуска электроэнергии на  $i$ -й линии за счет автоматизации;  $\lambda$  - удельная повреждаемость распределительной сети;  $L_i$ ,  $P_i$ ,  $T_{ли}$  - протяженность, средняя нагрузка и среднее время локализации поврежденного участка  $i$ -й линии;  $K_{ai}$  - коэффициент автоматизации  $i$ -й линии.

Коэффициент автоматизации представляет отношение математического ожидания нагрузки, сохраняющей питание при устойчивом повреждении на линии, к полной нагрузке линии [2] и зависит от схемы линии, количества и мест установки УС на ней и наличия АВР. Для определения  $K_a$  при расчете  $\Delta W_{ли}$  без использования в качестве исходной информации схемы линии представляет интерес анализ кривых рис. 1, где показано изменение  $K_a$  для различных условий на примере линии с равномерно распределенной нагрузкой. Кривая 1 соответствует последовательной установке УС на пути резервирования между подстанцией и пунктом АВР. При установке части УС на ответвлениях  $K_a$  находятся в зоне, ограниченной кривыми 1 и 2. При отсутствии АВР значения  $K_a$  находятся в зоне, ограниченной кривыми 2 и 3. Как видно из рисунка, при наличии АВР наиболее эффективна установка всех УС на пути резервирования.

При неравномерном распределении нагрузки вдоль линии использование рассмотренного ниже специального метода выбора мест установки УС на пути резервирования обеспечивает значение  $K_a$  больше, чем по кривой 1. Если УС устанавлива-

ется на ответвлении без нагрузки (наиболее эффективный случай), то для того чтобы получить значение  $K_a$ , соответствующее кривой 1, длина его должна быть не менее значений, определяемых кривой 4 в долях от полной длины линии. Практически  $n \leq 3$ , при этом  $l_* \geq 25\%$  длины линии. Учитывая, что такая конфигурация распределительной линии редко встречается на практике, в расчетах значение  $K_a$  определяется исходя из установки УС на пути резервирования в точках деления линии на участки, равные по длине или по нагрузке, что соответствует  $K_a = \max$  для линии с равномерно распределенной нагрузкой.

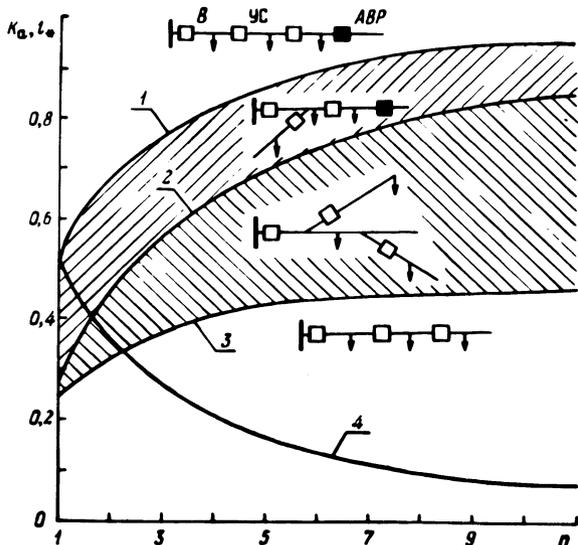


Рис. 1.

При составлении плана автоматизации силами самой эксплуатационной организации вместо (1) удобнее определять целесообразность мероприятия по повышению надежности (установка УС, автоматизация РС) по условию

$$k_{y_i} \leq k_{y_n} ; \quad k_{y_j} = \frac{K_j}{\Delta W_{lj}} ; \quad k_{y_n} = \frac{y_0}{E_n + p_{\Sigma}} , \quad (2)$$

где  $k_{y_i}$ ,  $K_j$  - удельные и полные капитальные затраты на выполнение  $j$ -того мероприятия;  $\Delta W_{lj}$  - сокращение недо-

отпуска электроэнергии при выполнении  $j$ -того мероприятия;  $K_{ун}$  - максимально допустимые капитальные затраты на предотвращение недоотпуска электроэнергии;  $E$  - нормативный срок окупаемости капитальных затрат;  $p_{\Sigma}^H$  - суммарные отчисления на амортизацию и обслуживание.

В этом случае вначале намечаются места установки АВР, затем по (2) определяется оптимальное количество УС и автоматизируемых резервных связей в распределительной сети, соответствующее принятым допущениям.

Определенный таким образом план автоматизации реализуется последовательно в течение продолжительного периода, поэтому необходимо определение очередности выполнения работ по повышению надежности. При выделении устройств и капитальных вложений в объеме, соответствующем плану, очередность выполнения мероприятий должна определяться из условия получения наибольшего экономического эффекта за время осуществления всех мероприятий. Однако, учитывая ограниченный выпуск устройств противоаварийной автоматики, очередность мероприятий намечается в порядке, обеспечивающем максимальную эффективность использования капитальных затрат при ограничении на общее количество устройств заданным  $N$ :

$$\min_N x_y = \min_N \left[ \min_j \frac{\sum_{j=1}^{N-1} K_j + K_N}{\sum_{j=1}^{N-1} \Delta W_{лj} + \Delta W_{лN}} \right] \quad (3)$$

Алгоритм (3) обеспечивает минимальный срок окупаемости капитальных вложений при любом  $N$  и позволяет не пересматривать принятые ранее решения об установке УС и АВР при увеличении их количества.

На автоматизируемых линиях определяются оптимальные места установки УС. Все известные методы выбора этих мест, например [3], основаны на направленном переборе вариантов. В отличие от них предлагается однозначный выбор мест установки УС на пути резервирования, обеспечивающий наибольшую их эффективность. Этот метод заключается в том, что УС устанавливаются в зонах, границами которых являются точки деления длины и нагрузки линии на равные части. При этом достигается максимальное снижение недоотпуска электроэнергии. Действительно, при установке одного УС

$$K_a = \begin{cases} 0,5 + 2 \frac{l_3 P_3}{LP} , & \text{в зоне } [L/2; P/2] ; \\ 0,5 - 2 \frac{l_3 P_3}{LP} , & \text{вне зоны } [L/2; P/2] , \end{cases}$$

где  $l_3, P_3$  - длина и нагрузка линии от места установки УС до точек  $L/2$  и  $P/2$  соответственно.

Точный выбор места установки УС в оптимальной зоне может быть произведен по максимальному значению  $K_a$ . Для инженерных расчетов значения, близкие к  $K_a = \max$  легко получить при установке УС за точкой, делящей нагрузку зоны на равные части, считая от границы зоны по нагрузке. Если имеется информация о величинах удельных ущербов отдельных потребителей, то вместо границы зоны по нагрузке может быть определена граница зоны установки, оптимальной по предотвращенному ущербу.

После выбора мест установки УС на пути резервирования определяется целесообразность секционирования ответвлений. При выполнении условия (2) указанное мероприятие включается в оптимальный план автоматизации.

На основе предложенной методики составлены программы для ЭВМ ЕС, которые используются как в проектных, так и в эксплуатационных организациях с целью разработки планов автоматизации распределительных сетей.

### Л и т е р а т у р а

1. Барг И.Г., Валк Х.Я., Комаров Д.Т. Совершенствование обслуживания электросетей 0,4 - 20 кВ в сельской местности. - М.: Энергия, 1980. - 240 с. 2. Прусс В. Л. Анализ мероприятий по повышению надежности работы распределительных линий 6 - 10 кВ. - Электрические станции, 1979, №6, с.42 - 46. 3. Зуль Н.М., Фролов В.А. Методика расчета оптимального сочетания средств повышения надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей. - В сб.: Научные труды по электрификации сельского хозяйства, 1974, т.37, с.108 - 121.

Л.Р.Сущенко, инженер (ЕПИ)

ПРИНЦИПЫ НОРМИРОВАНИЯ ЗАТРАТ НА ПЕРЕДАЧУ  
И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Процесс передачи и распределения электроэнергии сопровождается следующими видами затрат:

- годовые амортизационные отчисления  $I_1$ , тыс. руб.;
- годовые издержки на текущий ремонт и вспомогательные материалы  $I_2$ , тыс. руб.;
- годовые издержки на возмещение потерь энергии в сетях  $I_3$ , тыс. руб.;
- годовая заработная плата  $I_4$ , тыс. руб.;
- годовые издержки на капитальный ремонт  $I_5$ , тыс.руб.;
- прочие расходы  $I_6$ , тыс. руб.

В настоящее время их планирование осуществляется опытно-статистическим путем исходя из достигнутого уровня с учетом необходимости выполнения заданий вышестоящих органов по экономии материальных и трудовых ресурсов.

Рассмотрим как планируется каждая составляющая издержек в отдельности и проанализируем основные недостатки существующей практики их планирования.

Плановая величина амортизационных отчислений рассчитывается как сумма их отчетной величины за год, предшествующий плановому, и расчетной величины, зависящей от стоимости вновь вводимых основных фондов и сроков их ввода. При таком подходе амортизационные отчисления оказываются неуправляемой составляющей издержек.

Нормирование амортизационных отчислений должно быть увязано с нормированием капитальных вложений. В первую очередь нормированию подлежат капиталовложения в распределительные сети всех напряжений. Часть из них, расходуемая на присоединение новых потребителей, может быть выражена в функции прироста полезного отпуска энергии. Другая часть капиталовложений расходуется на повышение надежности электроснабжения потребителей и снижение потерь энергии в сетях за счет повышения их пропускной способности.

Капитальные вложения на повышение надежности и снижение потерь энергии должны выделяться под конкретные мероприятия по снижению недоотпуска электроэнергии и ее потерь в сетях. Капиталовложения на целевые мероприятия должны

выделяться исходя из ожидаемой величины снижения недоотпуска электроэнергии и потерь в сетях. Наконец, капиталовложения на сооружение наиболее крупных объектов: линий и подстанций напряжением 330 кВ и выше определяются непосредственно по сметам на соответствующие объекты.

С учетом вышеизложенного плановая (нормативная) величина амортизационных отчислений должна определяться по следующей формуле:

$$U_n = U_c + k_1 \delta W_{\text{по}} + k_2 \delta \Delta W_{\text{нед}} + k_3 \delta \Delta W_{\text{пот}} + \sum_{i=1}^n U_i,$$

где  $U_n$  - новое (нормативное) значение амортизационных отчислений;  $U_c$  - значение амортизационных отчислений за прошлый год;  $U_i$  - амортизационные отчисления от стоимости наиболее крупных из вновь вводимых объектов;  $\delta \Delta W_{\text{нед}}$  - принятое энергосистемой задание по снижению недоотпуска энергии;  $\delta \Delta W_{\text{пот}}$  - принятое энергосистемой задание по снижению потерь электроэнергии;  $k_1, k_2, k_3$  - коэффициенты пропорциональности, определяемые статистическим путем или исходя из заданного срока окупаемости капиталовложений.

Предлагаемый способ нормирования капиталовложений в электрические сети предусматривает объективный учет недоотпуска электроэнергии и его нормирование примерно в таком же виде, как осуществляется учет и нормирование потерь энергии.

Второй по важности и удельному весу является составляющая издержек на капитальный ремонт электрических сетей. Издержки на капитальный ремонт складываются из двух частей: затрат на заработную плату и затрат на материалы и оборудование, используемые при ремонте.

Фонд заработной платы на ремонт и эксплуатацию электрических сетей планируется совместно исходя из фактической численности сетевого персонала и средних должностных окладов работников. Задание по снижению фонда зарплаты распределяется между сетевыми предприятиями пропорционально их существующему фонду зарплаты без учета фактической трудоемкости обслуживания сетей, зависящей от их технического состояния и специфических условий работы разных ПЭС. Дефицитные материалы и оборудование делятся между ПЭС пропорционально поданным ими заявкам, при этом часть материалов и оборудования выделяется целевым назначением для выполнения капитального ремонта на ряде наиболее ответственных объектов.

Принципиальным недостатком такого распределения является то, что значительная часть ресурсов делится пропорционально заявкам, а последние далеко не всегда обоснованны.

Более правильным представляется такое распределение ресурсов на капитальный ремонт, при котором учитывается фактическая надежность работы сетей, характеризуемая величинами недоотпуска электроэнергии. Для распределения указанных ресурсов можно предложить следующую формулу:

$$P_{vi} = P_{ni} + (P_{\Sigma} - \sum_{i=1}^n P_{ni}) \frac{\Delta W_{\text{нед.}i}}{\Delta W_{\text{нед}\Sigma}},$$

где  $P_{vi}$  - ресурсы, выделяемые  $i$ -му подразделению;  $P_{ni}$  - ресурсы, необходимые для выполнения первоочередных работ;  $P_{\Sigma}$  - суммарный объем выделенных ресурсов, подлежащих распределению;  $\Delta W_{\text{нед}i}$  - отчетная величина недоотпуска энергии в сетях  $i$ -го подразделения;  $\Delta W_{\text{нед}\Sigma}$  - суммарный недоотпуск электроэнергии.

Следует подчеркнуть, что дефицитность (ограниченность) материальных и трудовых ресурсов является объективной реальностью долговременного характера. Поэтому задача совершенствования нормирования любых видов затрат должна решаться как задача оптимального распределения ограниченных ресурсов.

Подлежит распределению и суммарная плановая величина потерь энергии  $\Delta W_{\Sigma}^{\text{пл}}$ .

Наиболее простой и вместе с тем наиболее распространенный способ распределения состоит в том, что переменные потери делятся пропорционально их отчетным относительным величинам [1]. Основным недостатком такого способа распределения плановых заданий является то, что совершенно не учитывается разная напряженность прошлогоднего плана, которая автоматически переносится на планируемый год.

Для учета реальных возможностей снижения потерь в разных РЭУ предлагается находить плановые задания путем решения следующей системы уравнений [2]:

$$\Delta W_{\Sigma}^{\text{пл}} = k \sum_{i=1}^n (\Delta W_{\text{пост}i}^{\text{пл}} + \Delta W_{\text{пер}i}^{\text{отч}} \left( \frac{W_{\text{п}i}^{\text{пл}}}{W_{\text{п}i}^{\text{отч}}} \right) - \delta \Delta W_i^{\text{экс}} - \delta \Delta W_i^{\text{стр}});$$

$$\Delta W_i^{\text{пл}} = k \Delta W_{\text{пост}i}^{\text{пл}} + \Delta W_{\text{пер}i}^{\text{отч}} \left( \frac{W_{\text{п}i}^{\text{пл}}}{W_{\text{п}i}^{\text{отч}}} \right)^2 - \delta \Delta W_i^{\text{экс}} - \delta \Delta W_i^{\text{стр}},$$

где  $k$  – общий коэффициент пропорциональности, меньший 1;  $\delta \Delta W_i^{\text{экс}}$  – суммарный ожидаемый эффект от всех эксплуатационных мероприятий;  $\delta \Delta W_i^{\text{стр}}$  – суммарный ожидаемый эффект от всех мероприятий, запланированных по линии капитального строительства.

Что касается нормирования постоянных потерь, то к ним может быть такой же подход, как и к нормированию капиталовложений. За основу принимается прошлогодняя величина. К ней добавляются найденные прямым счетом постоянные потери в наиболее крупных из вновь вводимых трансформаторов и линий (потери на корону). Третья составляющая постоянных потерь определяется в зависимости от прироста полезного отпуска, пропорционально которому растет установленная мощность трансформаторов.

Связь между полезным отпуском и постоянными потерями может быть выражена следующим образом:

$$\Delta W_{\text{пост}} = \frac{q}{k_3} \cdot W,$$

где  $q$  – отношение потерь мощности в стали трансформаторов к их суммарной установленной мощности;  $k_3$  – коэффициент загрузки трансформаторов;  $W$  – суммарный полезный отпуск энергии.

С учетом этого плановая величина постоянных потерь принимает вид

$$\Delta W_{\text{пост}\Sigma} = \Delta W_{\text{пост}}^{\text{отч}} + \Delta W_{\text{пост}}^{\text{нт}} + \Delta W_{\text{кор}}^{\text{н.л}} + \frac{q}{k_3} \cdot W.$$

Таким образом, рассмотрены принципы нормирования составляющих издержек на передачу и распределение электроэнергии.

#### Л и т е р а т у р а

1. Маркович И.М. Режимы энергетических систем. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.-М.: Госэнергоиздат, 1963. – 359 с.
2. Планирование потерь энергии в электрических сетях / А.З.Красновский, В.Г.Пекелис, Л.П.Анисимов, И.З. Шапиро. – Электрические станции, 1979, № 1, с. 23 – 27.

А.И.Железняк, ст.науч.сотр., Н.К.Сенчук, канд.техн.наук  
(Бел ЭНИН)

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Планирование ремонтно-технического обслуживания электросетей – сложная комплексная проблема, при решении которой необходимо учитывать большое число технических и экономических показателей, характеризующих техническое состояние и ремонтпригодность электрооборудования, а также различные ограничения на проведение ремонтно-эксплуатационных работ. Затраты на ремонтное обслуживание в энергетике достигают сорока процентов от ежегодных капиталовложений в развитие отрасли и имеют тенденцию к постоянному повышению.

Ежегодно в электрических сетях для выполнения комплексных, капитальных, текущих и аварийных ремонтов, для проведения реконструктивных, расширительных и профилактических работ производится масса отключений различного оборудования и на различные сроки. Помимо этого на оборудовании проводятся работы, не связанные с отключением. Вывод электротехнического оборудования в ремонт снижает надежность электроснабжения, а в некоторых случаях приводит к недоотпуску электроэнергии, ухудшению ее качества, вызывает ее перерывы в электроснабжении потребителей. Практика совмещения по времени проведения ремонтных, профилактических и других работ на одном присоединении позволяет до некоторой степени снизить число отключений в энергосистеме и сократить ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителям. Однако совмещение во времени ремонтов оборудования ограничено ввиду снижения надежности энергосистемы при большом числе и длительности отключений, а также ввиду ограничений по наличию сил, средств и ресурсов электросетевых предприятий.

Основной задачей ремонтного обслуживания электросетей является обеспечение максимальной эксплуатационной готовности оборудования с минимумом затрат. Одним из путей уменьшения отрицательного влияния вывода оборудования в ремонт на качество и надежность электроснабжения является четкое планирование количества и длительности ремонтных работ, согласованное отключение ВЛ и оборудования подстанций, увязка планов работ между различными подразделениями и службами

электросетей, выбор из множества вариантов планов ремонтов наилучшего. При этом следует помнить, что в условиях ограниченного наличия ресурсов на выполнение ремонтов необходимо распределить их таким образом, чтобы получить максимальный эффект.

Сложность процессов планирования и управления ремонтами определяет необходимость их автоматизации, т.е. привлечения для решения этих проблем вычислительной техники.

При автоматизированном планировании ремонтов ВЛ и оборудования подстанций необходимо решать ряд задач, которые по своему функциональному назначению целесообразно объединить в комплексы. Структурная схема связей комплексов задач приведена на рис. 1.

Важнейшим элементом автоматизированной системы планирования ремонтно-технического обслуживания является нормативно-справочное обеспечение задач. Здесь необходимо выделить два аспекта – внешнее и внутреннее обеспечение. Первую часть составляют методические указания по планированию ремонтов, унифицированные входные и выходные документы, классификаторы, справочники, нормативы на выполнение работ и т.п. Разработкой и ведением этих материалов должны заниматься специализированные организации (ЦДУ ЕЭС

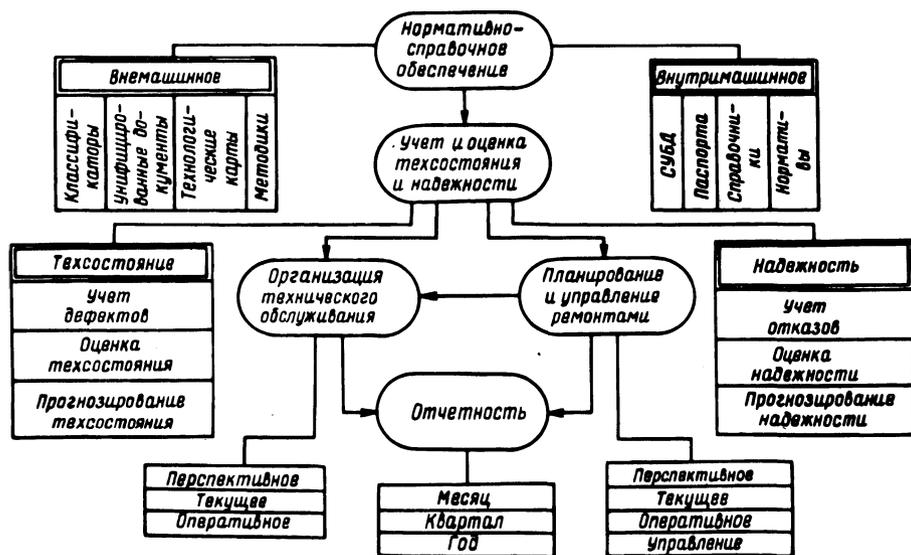


Рис. 1. Автоматизированная система планирования ремонтно-технического обслуживания электрических сетей.

СССР, Союзтехэнерго, ЦКБэнерго) при участии организаций – разработчиков АСУ.

К внутримашинному обеспечению относятся вопросы адаптации баз данных системы управления базами данных, предварительная обработка, хранение на машинных носителях и ведение паспортных данных, нормативов и справочников для решения комплексов задач АСУ энергоремонта.

Не имея сведений о техническом состоянии и надежности электросетей, невозможно выбрать оптимальный вариант плана ремонтов и тем самым наилучшим образом распределить имеющиеся ресурсы на повышение надежности электроснабжения потребителей. Следовательно, второй составляющей автоматизированной системы планирования ремонтов сетей является информационно-справочная система о надежности и техническом состоянии электросетей, функции и задачи которой рассмотрены в [1].

Третьей составляющей рассматриваемой системы будет непосредственное планирование и управление ремонтами электросетей, включающее в себя: перспективное (на 8–10 лет), текущее (на год) оперативное (на месяц) планирование и управление ремонтными работами.

При перспективном планировании на основании нормативов и требований о выполнении планово-предупредительных ремонтов составляются многолетние графики капитальных ремонтов. По мере необходимости сроки вывода в ремонт отдельных объектов электросетей корректируются с учетом их технического состояния. При этом следует стремиться к равномерному распределению суммарных объемов работ по годам. По укрупненным нормативам определяются потребности в материалах, механизмах и трудовых ресурсах по годам рассматриваемого периода, рассчитываются ожидаемые технико-экономические показатели ремонтов на перспективу.

Текущее планирование включает задачи уточнения объемов ремонтных работ, подлежащих выполнению в рассматриваемом году; выбора оптимального объема работ и перечня ремонтируемых объектов с учетом ожидаемого наличия ресурсов; расчета количества и длительности ремонтных отключений; выбора конкретных месяцев вывода в ремонт объекта по критерию минимума приведенных затрат [2]; расчета потребности в ресурсах по месяцам года и показателей надежности и экономичности для выбранного варианта плана ремонтов.

Функциями оперативного планирования ремонтов является уточнение и выбор оптимального, с учетом ограничения по

располагаемым ресурсам, объема работ для месячного планирования; составление месячного плана работ и использования механизмов, материалов и трудоресурсов с учетом ограничений; подготовка планов-заданий для ремонтных бригад.

Управление ремонтами предполагает осуществление контроля за ходом ремонтной кампании, оперативную коррекцию ранее составленных планов и графиков с учетом их выполнения, подготовку суточных заданий для ремонтно-эксплуатационного персонала и оперативное перераспределение ресурсов при выявлении критических работ.

Наряду с ремонтами энергосистемы выполняют большой объем работ по техническому обслуживанию (ТО) электросетей. К ним относятся обходы и осмотры ВЛ и оборудования, замер загнивания древесины опор, замер сопротивления изоляции и соединений, отборы проб масла на анализ, чистка и покраска металлоконструкций и т.п. Периодичность выполнения работ ТО различна - от нескольких раз в год до 2 - 3 лет. Следовательно, при их планировании необходимо составлять перспективные, текущие и оперативные графики.

Порядок составления перспективных графиков технического обслуживания аналогичен перспективному планированию капитальных ремонтов. При составлении годовых графиков техобслуживания необходимо иметь в виду, что некоторые работы ТО должны быть выполнены до начала ремонта (обход и осмотр, замер загнивания древесины, испытание изоляции и т.д.), часть выполняется совместно с ремонтными работами, а для остальных безразлично до или после ремонта они будут выполнены. Следовательно, годовой график ТО должен составляться после расчета годового графика ремонтов, а работы ТО по выявлению объемов ремонта необходимо планировать до начала выполнения ремонтных работ. В остальном годовые графики ТО составляются аналогично графикам ремонтов, т.е. с учетом располагаемых ресурсов определяется оптимальный годовой объем работ ТО и распределяется по месяцам.

Условие первоначального выполнения работ ТО или их совмещение с ремонтными работами необходимо учитывать и при составлении месячного графика техобслуживания.

После окончания ремонта и ТО персоналу предприятий электросетей приходится отчитываться о выполненных работах и израсходованных трудовых и материальных ресурсах. С целью освобождения его от этой работы предлагается ее автоматизировать. Входным документом может являться предлагаемая в

[1] "Ведомость дефектов" или карты ремонтов, которые должны содержать подробные сведения о выполненных работах и израсходованных при этом ресурсах.

### Л и т е р а т у р а

1. Александров В.Н., Сенчук Н.К. Вопросы сбора информации о техническом состоянии воздушных линий электропередач. - См.: наст. сборник, с.00-00. 2. Комплекс программ для планирования ремонтов электротехнического оборудования энергосистем/ Е.П.Забелло, Н.К.Сенчук, В.С.Урбанович, А.И.Железняк. - В сб.: Автоматические и автоматизированные системы управления в электроэнергетике. И.: ЭНИНа, 1977, вып. 60. с.124-127.

УДК 621.315.1:621.3.019.3

В.Н.Александров, инженер, Н.К.Сенчук, канд.техн.наук  
(БелЭНИН)

### ВОПРОСЫ СБОРА ИНФОРМАЦИИ О ТЕХНИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Надежность электроснабжения потребителей в значительной степени обусловлена техническим состоянием воздушных ЛЭП, которая в свою очередь зависит от состояния их элементов - опор, проводов, устройств грозозащиты, изоляции и т.п. За время эксплуатации линии, в основном под действием атмосферных условий, происходит старение элементов, физические характеристики их ухудшаются, что приводит к возрастанию потока отказов элементов и к увеличению объемов ремонтно-восстановительных работ. В среднем затраты на ремонты и техническое обслуживание 1 км воздушных линий напряжением 35 кВ и выше составляют порядка 3,7 тыс. рублей в год. Для правильного планирования состава и объемов ремонтных работ, срока вывода линии в текущий или капитальный ремонт, определения требуемых ресурсов необходимо иметь достаточно полное представление о техническом состоянии каждой линии. Это позволит оптимальным образом направить ограниченные ресурсы предприятий электрических сетей (ПЭС) на повышение или поддержание на необходимом уровне надежности электроснабжения потребителей.

В настоящее время техническое состояние линий электропередач определяется путем выполнения персоналом ПЭС ряда работ по обнаружению появляющихся дефектов (обходы и осмотры, измерения, испытания и т.п.). На основании полученных при этом результатов делается заключение о состоянии ЛЭП и о необходимости выполнения тех или иных ремонтных работ. При таком методе оценки заключение о техническом состоянии носит субъективный характер. Оно в какой-то степени справедливо для отдельно взятого ПЭС, в котором все сведения о техническом состоянии концентрируются у одного лица. Отсутствие количественных показателей не позволяет сравнивать состояние линий различных ПЭС и тем самым правильно распределять усилия на повышение надежности электроснабжения в пределах энергосистемы.

Все расширяющееся внедрение вычислительной техники в энергетике, создание подсистем АСУ позволяет сообщать, обрабатывать и накапливать помимо прочего и информацию, необходимую для получения числовых показателей надежности, технического состояния, их прогнозирования, сравнения показателей состояния ЛЭП различных ПЭС, зон и тем самым избежать субъективизма.

При автоматизации этого процесса необходимо решать следующие задачи:

- сбор информации о дефектах и отказах;
- контроль за их устранением;
- машинная обработка, хранение и накопление поступающей информации;
- расчет и коррекция показателей надежности и технического состояния;
- оценка фактического уровня надежности и технического состояния;
- прогноз надежности и технического состояния;
- выдача по запросам сведений о надежности и техническом состоянии.

Перечисленные задачи составляют справочно-информационную систему о надежности и техническом состоянии ВЛ. Информация, получаемая в результате решения задач системы, будет использоваться при планировании сроков и объемов выполнения ремонтных работ.

Решение задач системы базируется на использовании нормативно-справочной информации (НСИ), являющейся условно-постоянной, и переменной информации.

НСИ включает паспортные данные, справочники работ, дефектов, видов и типов оборудования и узлов, удельные нормативы на выполнение работ и некоторые другие сведения. Эта НСИ используется также и для решения ряда задач подсистем АСУ "Управление энергоремонтом" и "Материально-технического снабжения". Методы сбора, обработки и хранения НСИ в основном уже разработаны (Союзтехэнерго, БелЭНИН, АзНИИЭ и др.), внедрены или внедряются в энергосистемах Советского Союза и не рассматриваются в данной работе.

Часть переменной информации, необходимой для решения рассматриваемых задач, можно получить из карт отказов, методы сбора и обработки которых изложены в [1]. Карты отказов содержат подробные сведения об отказавшем узле и элементе – место, время, вид, тип и т.п. Поскольку отказ в работе узла или элемента является следствием необнаруженного или своевременно не устраненного дефекта, следовательно, своевременное устранение дефектов имеет решающее значение в предупреждении отказов. Учет их количества, видов и типов дефектных элементов позволяет судить о техническом состоянии ВЛ.

Для автоматизированного сбора информации о дефектах предлагается формализованный документ – "Ведомость дефектов" (табл. 1).

Таблица 1.

Ведомость дефектов

Характер дефекта или работы		Объем (количество)	Код задачи		Дата заполнения		Код ВЛ	
			Место обнаружения дефекта	Условия трассы	Срок устранения			
наименование	код дефекта (работы)					план	фактически	Причины отступления от плана

Ведомость дефектов состоит из:

- адресной части, содержащей код задачи, дату заполнения и код ВЛ;
- неформализованной части, которая занимает левую сторону документа и заполняется текстом с использованием справочников;

– формализованной части, в которой кодами указывается: характер дефекта (работы), количество и место обнаружения последнего, условия трассы, плановый и фактический срок устранения, причина отступления от планируемого срока. Если задача по учету паспортных данных в энергосистеме не функционирует, то в предложенный входной документ вводятся графы, характеризующие вид и тип дефектного оборудования, узла.

Заполнение неформализованной части документа может осуществляться эксплуатирующим сеть персоналом непосредственно при проведении работ по обнаружению дефектов, а кодирование выполняется персоналом подразделений АСУ. Составленная "Ведомость дефектов" хранится в ПЭС и по мере появления или устранения дефектов она корректируется. Периодичность поступления данных о дефектах в ИВЦ определяется цикличностью работ по определению и устранению дефектов.

В настоящее время предусмотрен ввод исходных данных как с перфокарт (передача информации по почте), так и с пятидорожечной перфоленты в телетайпном коде М-2 (передача информации по телетайпным каналам связи).

Нужно отметить, что ни один из перечисленных способов передачи информации не является удобным. Недостатком первого является наличие большого количества ошибок, а второго – неоправданная загрузка телетайпа. Поэтому важным условием успешного функционирования комплекса является разделение решения задачи по обработке дефектов между иерархическими уровнями энергосистемы на базе применения микроЭВМ. Это позволит получить информацию в агрегированном виде, записывать ее на магнитную ленту, с которой и будет впоследствии осуществляться ввод в ЭВМ кустового ВЦ.

Предложенный способ передачи данных повысит качество и скорость ввода информации, что имеет большое значение при функционировании задач АСУ, а функциональное распределение задачи сбора информации о дефектах позволит более рационально использовать ЭВМ.

Создание архива дефектов (работ) позволяет оценить деятельность ПЭС, правильно проводить отбраковку информации, построить модель прогноза объемов работ, а следовательно, определять оптимальный объем ремонтно-восстановительных работ.

Можно сделать предположение о том, что процесс сбора информации об объемах работ является простым отбором из  $n$  наблюдений. Вместо оценки выборочного среднего  $\bar{x}$  работы произведем стратификацию этой выборки. Каждый слой

представляет собой множество объектов с одинаковым сроком эксплуатации и является подмножеством множества линий, которые выполнены на одинаковых опорах и принадлежат к одному и тому же классу напряжения. Если объем слоя достаточен, найдем средние оценки и дисперсии объемов работ каждого слоя.

Возможны случаи отсутствия каких-либо данных в слое (пустые слои). В [2] приводятся пути преодоления этой сложности.

Аналогичные рассуждения могут быть применены и к определению объемов дефектов.

### Л и т е р а т у р а

1. Комплекс задач АСУ по учету и анализу информации об отключениях и повреждениях электроустановок/ З.Б. Севрюк, Г.И.Балуева, Г.А.Сенькина, Э.С.Шварц и др. – В сб.: Автоматизация управления Белорусской энергосистемой. – Минск: Польша, 1975, с.29 – 32. 2. Клейнен Дж. Статистические методы в имитационном моделировании. – М.: Статистика, 1978, вып. 1. – 221 с.

УДК 621.311.016.3.001.573:681.3

У.Бернхардт, инженер (ГДР)

### ВЕРОЯТНОСТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАФИКОВ НАГРУЗОК ЭНЕРГОСИСТЕМ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Ввиду большого влияния электрических нагрузок на принятие решений в задачах оптимизации и развития энергосистем вопросам вероятностного определения и моделирования графиков нагрузок энергосистем в последние годы уделяется большое внимание. При этом основная цель заключается в обобщенном представлении электрических нагрузок на определенном интервале времени, отражающем их внутренние существенные связи и позволяющем их описывать аналитически.

В этих целях автором была создана программа для ЕС ЭВМ "KATRIN", производящая статистический анализ графиков нагрузок. Она позволяет определить такие их числовые характеристики, как математическое ожидание (МО), дисперсия, среднеквадратичное отклонение (СКО), коэффициент корреляции

графиков активной  $P(t)$  и реактивной  $Q(t)$  нагрузок, коэффициенты линейного уравнения регрессии

$$Q'(t) = A + BP(t). \quad (1)$$

Представление графика  $Q(t)$  как вероятностной функции  $Q'(t)$  от  $P(t)$  полезно для моделирования  $Q(t)$  лишь при известном графике  $P(t)$ . Коэффициенты  $A$  и  $B$  определяются методом наименьших квадратов [1].

Программа также предназначена для определения коэффициентов нестационарной гармонической модели графиков нагрузок [2]. Ввиду высокой степени периодической устойчивости графиков нагрузок, вызванной ритмичностью потребления электрической мощности, целесообразна их тригонометрическая интерполяция с помощью интегралов Фурье, что способствует аналитическому описанию.

Кроме того, программа позволяет установить распределение суточных графиков нагрузок (для выяснения характера их законов распределения) и степень устойчивости реализации характерных графиков (например, 10 рабочих дней), для чего определяются МО, дисперсия, СКО, распределение и автокорреляционная функция в каждый час рассматриваемого графика, а также гармонический состав усредненного графика и другие показатели.

Проведенные автором многочисленные расчеты электрических нагрузок позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Для аналитического описания устойчивых временных трендов графиков электрических нагрузок выгодно применять нестационарную гармоническую модель. В этом случае МО трендов не искажаются, хорошо воспроизводится периодичность процесса. Для случая суточных трендов [2] при включении первых пяти гармонических среднеквадратичная погрешность аппроксимации находится в пределах 1 - 4% для графиков активной и 0,4 - 2% для графиков реактивной нагрузок (по отношению к  $P(t)_{\max}$ ). Естественное и искусственное усреднение графиков потребителей приводит к снижению погрешности на 1 - 2% за счет отбрасывания случайных отклонений.

Аналогично [2] может быть представлен недельный тренд. Годовой тренд целесообразно представить в виде

$$P'_O(r) = P_O(r_2) + \frac{P_O(r_1) - P_O(r_2)}{2} \left( \cos \frac{2\pi}{T} r + 1 \right) + \frac{2 \Delta_{\text{год}}^e}{100T} r, \quad (2)$$

здесь  $P_0(r_1)$  и  $P_0(r_2)$  – суточные МО зимнего ( $r_1$ ) и летнего ( $r_2$ ) графика рабочих дней;  $e$  – годовой прирост мощности в % от  $\Xi_{\text{год}}$  за период  $T=365$  дней.

2. Нормированный коэффициент корреляции между графиками  $P(t)$  и  $Q(t)$  находится в пределах 0,7 – 0,95, что говорит о высокой степени их взаимосвязи и утверждает приемлемость [1]. СКО находится в пределах 1 – 4%. Полезным оказывается, что замена  $P(t)$  в (1) на его гармонически аппроксимированный график приводит фактически к идентичным СКО.

3. Приведение коэффициентов гармонической модели [2] и уравнения (1) к суточным МО позволяет использовать их в качестве типовых. Тогда, например, годовой тренд можно моделировать, задавая соответствующий тип суточного и недельного тренда, зимнее и летнее МО графика рабочих дней и годовой прирост для данного узла нагрузки.

4. Почасовые СКО от их МО лежат в пределах 5–15% от суточного МО. Ввиду фактического отсутствия корреляционной связи между почасовыми СКО и их МО ( $R < 0,5$ ) целесообразно принимать постоянство и равенство их средним величинам. Хотя почасовые автокорреляционные функции остаточных членов процесса [1]  $P_{\xi}(t)$  и  $Q_{\xi}(t)$  показывают переменный характер, по практическим соображениям можно предполагать для них нормальный закон распределения с описанным СКО. Тогда процесс потребления мощности можно представить как

$$P(t) - jQ(t) = P'(t) + P_{\xi} - j[Q(t) + Q_{\xi}], \quad (3)$$

здесь  $P'(t)$  и  $Q'(t)$  – аппроксимирующие графики действительных графиков  $P(t)$  и  $Q(t)$ , а  $P'(t)$  в общем виде по выражению

$$P'(t) = \prod_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij} \cos\left(\frac{2\pi}{T_i} jt - \theta_{ij}\right), \quad (4)$$

где  $i$  – номер учитываемого тренда с периодом  $T_i$ ;  $j$  – номер гармонической ( $j = 0, 1, \dots$ )  $i$ -го тренда с амплитудой  $P_{ij}$  и фазовым углом  $\theta_{ij}$ . График  $Q'(t)$  может быть представлен аналогично (4) или по выражению (1).

Для эффективного определения параметров (3) создана программа APPDAY, выбирающая из набора типовых суточных тренд, APPWE и APPYEAR для представления недельных и годовых трендов.

Предложенная вероятностно-определенная нестационарная модель графиков нагрузок может быть использована в целях прогнозирования графиков нагрузок и электропотребления для времени устойчивости входящих в нее трендов, определения таких характеристик, как максимум, минимум, средняя средне-квадратичная величина,  $T_{\text{макс}}$ ,  $\tau$  и др.

Созданная автором программа для ЕС ЭВМ "АДЕКВАТ" позволяет моделировать годовой график нагрузок потребителей с учетом суточного, недельного и годового трендов (см. п.4), определять вышеназванные величины и годовое распределение.

Гипотеза о нормальном законе распределения [1] не противоречит опытным данным. Поэтому, зная годовое МО и СКО, годовой график можно в определенных целях статистически моделировать, например, для определения баланса [3] реактивной мощности узлов нагрузок, что также реализовано в программе.

"АДЕКВАТ" способствует уточнению определения потерь энергии. Оперирование в этих целях с величинами  $P_{\text{макс}}$  и  $\tau$  в сложозамкнутых сетях приводит к труднооценимым погрешностям. Обладая вышеописанной моделью, целесообразно на основе временной синхронизации всех графиков нагрузок данной энергосистемы  $l = 1, 2, \dots, N$  выделить определенное количество характерных режимов  $h = 1, 2, \dots, K$ , адекватно отражающих годовые графики. Если интервалы синхронизации выделить таким образом, чтобы распределение внутри них было близко к нормальному, то средние  $\dot{S}_{1n}$  и среднеквадратичные мощности  $\dot{S}_{1n}^{\text{сркв}}$  этих интервалов будут фактически идентичны и годовые графики нагрузки энергосистемы можно представить в матричном виде:

$$\dot{S}^{\text{сркв}} \approx \begin{vmatrix} \dot{S}_{11} \dots \dot{S}_{1n} \dots \dot{S}_{1K} \\ \dot{S}_{11} \dots \dot{S}_{1n} \dots \dot{S}_{1K} \\ \dots \\ \dot{S}_{N1} \dots \dot{S}_{Nh} \dots \dot{S}_{NK} \end{vmatrix} \quad (5)$$

Величины матрицы (5) определяются программой "АДЕКВАТ" для  $K=18$  и  $24$ . Потери энергии в системе можно опеределить, рассчитывая потери мощности для каждого режима  $h$  (столбца матрицы) и умножая их на время существования режима  $t_h$ :

$$\delta \mathcal{E} = \sum_{h=1}^K \delta P_{h t_h}. \quad (6)$$

Проведенные расчеты утверждают приемлемость предлагаемой методики.

### Л и т е р а т у р а

1. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: -М.: Изд-во физико-математической лит., 1962, -564с. 2. Бернхардт У. Нестационарная гармоническая модель суточных графиков электропотребления. -Изв. вузов. Энергетика, 1980, №9, с.102-106. 3. Бернхардт У. Определение баланса реактивной мощности на основе вероятностной модели графиков нагрузок. -Изв. вузов. Энергетика, 1981, №9, с.95-99.

УДК 621.315.21:537.312.62

И.А.Ступак, ст.преподаватель (БПИ)

### ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НЕКОТОРЫХ СХЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОЕМКИХ ПРОИЗВОДСТВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Для электроснабжения крупных потребителей и электроемких производств промышленных предприятий разработано много разновидностей электропитающих схем традиционного исполнения. При больших рабочих токах в этих схемах имеются значительные потери мощности и энергии. Снизить эти потери позволяют сверхпроводящие источники и токопроводы в их сочетании с обычным электропитающим оборудованием.

На этом основании, используя обычные и нетрадиционные источники и коммутационные аппараты, можно сформировать разнообразные схемы (модели) электроснабжения электроемких производств и крупных потребителей промышленных предприятий

Основной задачей данной статьи является разработка алгоритмов и составление программ расчета технико-экономических показателей (ТЭП) отдельных элементов, формирование различных моделей электроснабжения электроемких производств, выполнение расчетов для отдельных элементов и моделей на ЭВМ, исследование и анализ полученных результатов.

Для определения ТЭП схем электроснабжения были установлены аналитические зависимости стоимости отдельных элементов этих схем от энергетических (мощности, напряжения, то-

ков) показателей, частоты вращения, поперечного сечения и других параметров оборудования.

Для получения основных уравнений корреляционной связи использованы линейные и показательные уравнения [1], которые в общем виде записываются:

$$Y_i = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n; \quad (1)$$

$$Y_i = a_0 \cdot f_1(x_1) \cdot f_2(x_2) \cdot \dots \cdot f_n(x_n); \quad (2)$$

$$Y_i = b_0 x_1^{b_1} \cdot x_2^{b_2} \cdot \dots \cdot x_n^{b_n}. \quad (3)$$

Уравнение (2) – произведение нескольких функций, дающее в результате общее уравнение регрессии для оценки стоимостных соотношений от многофакторных показателей исследуемых элементов.

Разработанные алгоритмы сверхпроводящих схем электрооборудования электроемких производств и крупных потребителей построены на основе отдельных алгоритмов для каждого элемента схемы. Основными показателями каждого алгоритма являются: единичные и суммарные капиталовложения во все генерирующие источники, годовые эксплуатационные расходы, потери мощности и энергии, приведенные затраты, удельные приведенные затраты, удельная стоимость 1 кВт·ч потерь энергии и другие технико-экономические показатели.

Поставленная задача реализуется по частям в определенной последовательности.

1. Разработка алгоритмов определения капиталовложений в отдельные элементы сформированных моделей. На основании [1] и уравнений (1), (2), (3) в зависимости от различных факторных признаков для некоторых источников питания укрупненно получены с учетом прогнозирования корреляционные уравнения капитальных вложений. Например, для автотрансформаторов напряжением 110/6,6...11 кВ

$$K_{AT_i} = k_M \cdot a_0 (a_1 + b_1 S_{Hi}) a_2 U_{номi}^{b_2}; \quad (4)$$

для обычных двухобмоточных трансформаторов напряжением 35/6,3...10,5 кВ с РПН и без РПН

$$K_{OT_i} = k_M \cdot a_0 (a_1 + b_1 S_{Hi} + c_1 S_{Hi}^2); \quad (5)$$

для генераторов постоянного тока напряжением до 1000 В

$$K_{ГПГ_i} = k_M \cdot a_0 \left[ (a_1 + b_1 P_i - c_1 P_i^2) (a_2 + b_2 U_{ном_i} - c_2 U_{ном_i}^2) (a_3 - c_3 n_i^2) \right]; \quad (6)$$

для генераторов электролизных установок напряжением 115... 230 В

$$K_{ГЭУ_i} = k_M \cdot a_0 (a_1 + b_1 P_i - c_1 P_i^2) (a_2 - b_2 U_{ном_i}^2); \quad (7)$$

для генераторов общепромышленного применения напряжением 0,75...0,9 кВ

$$K_{ГОП_i} = k_M (b_0 + b_1 P_i - b_2 U_{ном_i} - b_3 n_i); \quad (8)$$

для униполярных генераторов мощностью до 100 МВт при токах до 600 кА и напряжениях до 167 В

$$K_{УГ_i} = k_M (a_0 \cdot a_1 P_i^{b_1}); \quad (9)$$

для турбогенераторов напряжением 6,3...20 кВ

$$K_{ТГ_i} = k_M \cdot a_0 (a_1 + b_1 P_i - c_1 P_i^2) a_2 U_{ном_i}^{b_2}; \quad (10)$$

для выпрямительных агрегатов ВАК В2 на 12,5 и 25 кА при номинальных напряжениях 0,075...0,85 кВ

$$K_{ВАК_i} = k_M \cdot a_0 (a_1 + b_1 P_{di} \pm c_1 P_{di}^2), \quad (11)$$

где  $k_M$  - коэффициент, учитывающий стоимость строительно-монтажных работ, устройств защиты, автоматики и управления;  $a_0, a_1 \dots a_3, b_1 \dots b_3, c_1 \dots c_3$  - коэффициенты регрессии, полученные расчетным путем на ЭВМ "Минск-22", которые здесь не приводятся. Знак (+) в уравнении (11) относится к ВАК В2, рассчитанному на номинальный ток 12,5 кА, а (-) соответственно - на ток 25 кА.

С учетом [1] и (1),(2),(3) получены также основные уравнения регрессии для других элементов схем – выключателей различных типов от МГТ-10 до ВАБ-28, токопроводов (шинопроводов) постоянного и переменного напряжений, обычных и маслонаполненных кабелей. Уравнения регрессии для этих элементов здесь не приводятся.

2. Оценка годовых эксплуатационных расходов, потерь мощности и энергии. Годовые эксплуатационные расходы по [2] укрупненно определяются

$$C_{Э_i} = p_{отч} \cdot K_{\Sigma} \quad (12)$$

где  $p_{отч}$  – норма амортизационных отчислений и издержек на

капитальный ремонт и обслуживание;  $K_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=m} K_i$  – суммарные капитальные вложения в элементы схем;  $i = 1, 2, 3, \dots, m$  – количество элементов в схеме.

На основании паспортных данных или прогнозируемых значений КПД источника и соответствующих им мощностей определяются потери мощности. Для вращающихся источников питания и выпрямительных агрегатов ВАК В2

$$\Delta P_i = P_{нi} (1 - \eta_{нi}) / \eta_{нi} \quad (13)$$

Потери электроэнергии для этих источников на основании выражения (13) определяются по формуле

$$\Delta \mathcal{E}_i = n_i k_{п} \Delta P_i T_i + \frac{1 - k_{п}}{n_i} \Delta P_i k_{нг}^2 \tau_i \quad (14)$$

Для статических источников (трансформаторов и автотрансформаторов) соответственно потери электрической энергии вычисляются [2]

$$\Delta \mathcal{E}_i = n_i \frac{(\alpha_{ст} - \beta_{ст} S_{нi}) S_{нi}}{100} \cdot 8760 + \frac{1}{n_i} \frac{(\alpha_{м} - \beta_{м} S_{нi}) S_{расч,i}^2}{100 S_{нi}} \cdot \tau_i \quad (15)$$

где  $n_i$  – количество источников, включаемых на параллельную работу;  $k_{п}$  – коэффициент, учитывающий долю потерь, не зависящих от нагрузки;  $T_i$  – время нормального функционирования

источника в течение года;  $k_{нг} = P_{расч. i} / P_{н i}$  - коэффициент загрузки источника;  $\tau$  - годовое время максимальных потерь в зависимости от часов годовой продолжительности использования активной мощности для алюминиевых заводов при  $T_{max} = 8500$  ч;  $S_H$  - номинальная мощность трансформатора и автотрансформатора;  $\alpha_{ст}, \beta_{ст}, \alpha_M, \beta_M$  - коэффициенты, зависящие от типа трансформатора или автотрансформатора;  $S_{расч. i} = P_{расч. i} / \cos \varphi$  - расчетная мощность электропередачи.

Стоимость потерь электроэнергии с учетом соотношений (14) и (15)

$$C_{\Delta \mathcal{E} i} = 10^{-2} \Delta \mathcal{E} i \beta, \quad (16)$$

где  $\beta$  - стоимость одного кВт.ч потерянной электроэнергии, коп/кВт.ч.

3. Определение приведенных затрат. Для исследуемых элементов схем электроснабжения с учетом выражений (12) и (16) функция приведенных затрат

$$Z_i = p_n K_{\Sigma} + C_{\mathcal{E} i} + C_{\Delta \mathcal{E} i}, \quad (17)$$

где  $p_n$  - нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, принятый равным 0,15

Удельные приведенные затраты

$$Z_{уд. i} = Z_i / P_{расч. i} \quad (18)$$

Стоимость 1 кВт.ч переданной потребителю электроэнергии

$$C_{pi} = Z_i / (P_{расч. i} T_{max}), \text{ коп/ (кВт.ч)}. \quad (19)$$

По выражению (12),  $P_{расч. i}$  и  $T_{max}$  [2] определяется себестоимость передачи электроэнергии

$$\beta_{pi} = C_{\mathcal{E} i} / (P_{расч. i} T_{max}). \quad (20)$$

Зависимости (4)...(11) и  $P_{расч. i}$  позволяют рассчитать удельные капиталовложения

$$k_{уд. i} = K_i / P_{расч. i} \quad (21)$$

На основании выражений (4)...(21) и других, здесь не приводимых, составлена программа расчета технико-экономических показателей каждого элемента и всей модели в целом и реализована на ЭВМ ЕС-1020 на языке Фортран-1У.

4. Анализ исследованных схем электроснабжения промпредприятий. Для исследования и анализа выбрано только два варианта моделей (рис. 1). Расчет производился при следующих исходных данных: передаваемая мощность  $P_{расч} = 5 \dots 500$  МВт, постоянное напряжение  $U_{ном} = 0,048; 0,22; 0,44; 0,85$  кВ, переменное -  $U_{ном} = 6,10,20,35$  кВ, длина сверхпроводящей линии  $L = 1 \dots 15$  км. Из-за малого объема статьи приводятся только некоторые графические зависимости ТЭП от расчетной мощности (рис. 2).

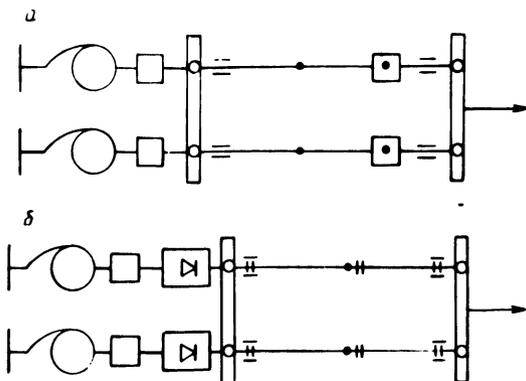


Рис. 1. Исследуемые модели переменного (а) и постоянного (б) тока.

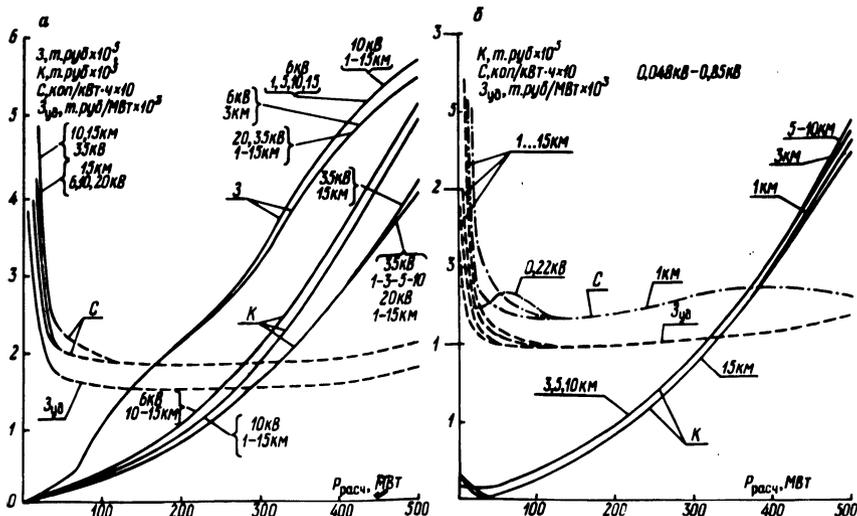


Рис. 2. Зависимость технико-экономических показателей сверхпроводящих схем электроснабжения переменного (а) и постоянного тока (б) от расчетной мощности для рис. 1, а, б.

5. Выводы. 1) Характер изменения капиталовложений при возрастании передаваемой мощности не меняется при изменении длины сверхпроводящей линии в пределах (1...15) км. Разброс численных значений капитальных затрат в исследуемые модели для различных длин сверхпроводящего кабеля при одном и том же напряжении лежит в пределах (1...3)%. Большее значение относится к меньшим величинам напряжений переменного тока. Для постоянного напряжения при увеличении  $P_{расч.}$  разброс численных значений капиталовложений колеблется вблизи 1%... 2) Закономерность изменения удельных приведенных затрат при различных напряжениях и стоимость 1 кВт·ч переданной потребителю электроэнергии для схем электроснабжения переменного и постоянного тока примерно одинакова и минимум лежит в широком диапазоне изменения мощностей 100...500МВт.

#### Л и т е р а т у р а

1. Сборник типовых программ для ЭВМ "Минск-22". - Минск: НИИЭМП, 1974, вып. 4. - 154 с. 2. Поспелов Г.Е., Федин В.Т. Проектирование электрических сетей и систем. - Минск: Высшая школа, 1978. - 304 с.

УДК 621.316.1

Я.Сервотка, инженер, М.П.Клюйко, инженер,  
В.Н.Юрасюк, инженер (БПИ)

#### МИНИМИЗАЦИЯ РАСХОДА ГОРЮЧЕГО ЗА ПРОЦЕСС ПОИСКА ПОВРЕЖДЕННОГО УЧАСТКА В ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6 - 20 кВ

В настоящее время в сетях 6 - 20 кВ для поиска поврежденного участка наибольшее распространение получили следующие методы: проверка мегомметром, пробные включения и проверка сети указателем повреждения. Применяется ряд мер к возможно более быстрому отысканию поврежденных участков сети, устранению повреждения и восстановлению электроснабжения потребителей. Хорошие результаты дает применение оптимальных стратегий в работе диспетчерских служб, позволяющих вести поиск повреждения и восстановление электроснабжения на основе конкретных расчетов, а не интуитивно [1].

Применение оптимальных стратегий минимизирует основные количественные показатели (недоотпуск электроэнергии, время поиска или длину пути проезда), характеризующие эффективность управления. С целью выбора оптимального управления разработаны математические модели и программы оптимизации процесса поиска поврежденного участка в городских сетях 6 - 20 кВ с помощью ЭВМ.

Рассмотрим основные положения построения математической модели поиска поврежденного участка методом пробных включений. Отключившаяся распределительная линия делится оперативно-выездной бригадой (ОВБ) в одной из трансформаторных подстанций (ТП) на две части. После этого из источника питания (ИП) производится пробное включение. Если включение было успешным и прилежащая к ИП часть линии включалась в работу, то поиск неработоспособного участка во второй части обычно ведется с помощью проверок изоляции кабелей мегомметром. При включении на короткое замыкание неповрежденные участки вводятся в работу со стороны точки нормального деления, а оставшаяся часть линии вновь разделяется надвое и с ИП выполняется новое пробное включение. Указанные действия продолжаются до нахождения и локализации поврежденного элемента. Число включений на короткое замыкание (неуспешных включений) ограничивается местными инструкциями предприятия электрических сетей. Формализуем описанный процесс.

В начале поиска ОВБ должна посетить ИП и осмотреть отключившийся выключатель. Затраты времени на осмотр оборудования ИП определяются как

$$T_{\text{ИП}} = t_{\text{вх}}^{\text{ИП}} + t_{\text{осм}}^{\text{ИП}} + t_{\text{вых}}^{\text{ИП}}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{вх}}^{\text{ИП}}$  и  $t_{\text{вых}}^{\text{ИП}}$  - время, необходимое на вход в ИП и выход из него;  $t_{\text{осм}}^{\text{ИП}}$  - время осмотра силового выключателя.

Обозначим местонахождение ОВБ к началу шага через  $r$  (для первого шага  $r = \text{ИП}$ ), ТП, в которой производится включение работоспособной части схемы  $b$ , а ТП деления через  $g$ . Тогда время, требуемое на проезд от  $r$  и  $g$ , может быть найдено как

$$t_{r-g} = \frac{K_n l}{U} r - g, \quad (2)$$

где  $l_{r-g}$  - суммарная длина линий электропередачи на пути от  $r$  к  $g$ ;  $K_n$  - коэффициент, учитывающий несоответствие пути проезда и длины линий электропередачи ( $K_n = 1,20 - 1,25$ );  $U$  - скорость движения оперативной машины ( $U^n = 30$  км/ч).

Затраты времени в ТП- $g$  находятся по выражению

$$T_g = t_{вх} + t_{оп} + t_{вых}, \quad (3)$$

где  $t_{вх}$  и  $t_{вых}$  - время, необходимое на вход в сетевой объект и выход из него;  $t_{оп}$  - время, требуемое на включение и отключение коммутационного аппарата.

Выполнив деление линии на 2 части. ОВБ возвращается на ИП и проводит пробное включение. Для этой операции необходимо время

$$T_{пв} = t_{вх}^{ИП} + t_{оп}. \quad (4)$$

Если пробное включение оказалось неуспешным, то восстановление электроснабжения потребителей неповрежденной части распределительной линии производится из точки  $b$ , удаленной от ИП на расстояние  $l_{ИП-b}$ . Время  $t_{ИП-b}$ , необходимое на проезд ОВБ в эту точку, может быть найдено по выражению, аналогичному (2). В этом случае также следует учесть затраты времени на операцию по включению

$$T_b = t_{вх}^b + t_{оп}, \quad (5)$$

где  $t_{вх}^b$  - время, необходимое на вход в ТП- $b$ .

Будем считать, что каждый шаг поиска завершается включением нагрузки потребителей неповрежденной части схемы. Тогда суммарные затраты времени на первом шаге могут быть определены по выражению

$$T_1 = T_{ИП} + 2 t_{r-g} T_g + T_{пв} + f_1 (t_{вых}^{ИП} + t_{ИП-b} + T_b), \quad (6)$$

где  $f_1$  - единичная ступенчатая функция;

$$f_1 = \begin{cases} 0 & \text{если включение успешное;} \\ 1 & \text{если включение на короткое замыкание.} \end{cases}$$

В начале каждого последующего шага  $j > 1$  ОВБ должна выйти из сетевого объекта, являющегося местом включения на

шаге  $(j - 1)$ , и получить по радиосвязи указания о порядке дальнейших действий, что требует затрат времени

$$T_{\text{вс}} = t_{\text{вых}} + t_{\text{р}}, \quad (7)$$

где  $t_{\text{р}}$  - время радиосвязи ОВБ с диспетчером.

Суммарные затраты времени на шаге  $j$  при неуспешном пробном включении на предыдущем этапе поиска подсчитываются по такой формуле:

$$T_j = T_{\text{вс}} + t_{\text{р-г}} + T_{\text{г}} + t_{\text{г-ИП}} + T_{\text{пв}} + f_1 (t_{\text{ИП-вых}} + t_{\text{ИП-б}} + T_{\text{б}}), \quad (8)$$

где  $t_{\text{г-ИП}}$  - затраты времени на проезд от места деления до ИП.

При успешном включении поиск продолжается методом проверок мегомметром.

Недоотпуск электроэнергии потребителям за  $j$ -й шаг поиска поврежденного участка и восстановления электроснабжения будет равен

$$\Delta W_j = P_j T_j, \quad (9)$$

где  $P_j$  - суммарная нагрузка ТП, невключенная к началу шага  $j$ .

Математическое ожидание недоотпуска электроэнергии за процесс поиска определяется как

$$M(\Delta W_{\text{П}}) = \sum_{i=1}^n q_i \Delta W_{\text{П}i}, \quad (10)$$

где  $\Delta W_{\text{П}i}$  - недоотпуск электроэнергии потребителям за время поиска при отказе  $i$ -го элемента;  $q_i$  - вероятность повреждения  $i$ -го элемента.

Большое значение для величины  $M(\Delta W)$  при пробном включении имеет выбор разъединителя деления в ТП-г.

Для ТП-г с одной входящей и одной выходящей линией отключаем разъединитель таким образом, чтобы ТП-г оказалось в подмножестве с меньшей суммарной длиной участков. Это обеспечит минимум недоотпуска электроэнергии и времени поиска, так как для такого подмножества вероятность повреждения участка линий будет меньшей.

В случае ТП- $g$  с одной входящей и несколькими выходящими линиями руководствуемся тем же принципом. Разделяем сеть на два подмножества таким образом, чтобы разница между суммарными длинами участков подмножеств была минимальной, а ТП- $g$  оказалось в подмножестве с меньшей их суммой.

В случае отключения другого разъединителя или всех разъединителей математическое ожидание недоотпуска электроэнергии возрастает.

Одним из важных критериев оптимизации поиска поврежденного участка является минимум расхода горючего за время проездов ОВБ. Экономия горючего пропорциональна сокращению длины проезда во время локализации повреждения.

Для минимизации длины пути проезда выбор оптимальной стратегии необходимо проводить по максимальной эффективности длины пути проездов на каждом шаге. В этом случае критерий оптимальности представляет собой математическое ожидание включаемой на единицу длины пути проезда нагрузки и определяется по выражению

$$e_{kj} = \sum_{\nu=1}^M \frac{q_{\nu}}{L_{\nu}} \frac{m-m_{\nu}}{\sum_{s=1}^{m-m_{\nu}}} K_{ps} P_s, \quad (11)$$

где  $M$  - число подмножеств, образуемых в ТП- $g$  и проверки;  $q_{\nu}$  - априорная вероятность повреждения одного из элементов  $\nu$ -го подмножества;  $T_{\nu}$  - суммарные затраты времени на оптимизируемом шаге при повреждении элемента  $\nu$ -го подмножества;  $m$  - количество ТП в рассматриваемой (невыключенной) части сети;  $m_{\nu}$  - количество ТП в подмножестве  $\nu$ ;  $P_s$  - активная мощность нагрузки ТП в пункте  $s$ ;  $K_{ps}$  - коэффициент полезности электроснабжения, учитывающий ответственность потребителей в пункте  $s$ .

Применение этого критерия в отдельных случаях приводит к выбору стратегии, которая не минимизирует длины пути проездов.

Более точное решение дает метод локальной оптимизации с приближенной оценкой на каждом шаге глобального критерия, в качестве которого применяется математическое ожидание длины пути проезда. Оптимизация по данному методу заключается в следующем.

На первом шаге в качестве ТП- $g$  поочередно рассматриваются все ТП- $g$  распределительной линии (за исключением тупиковых). Выбор ТП- $g$  на последующих шагах осуществ-

вляется по условию  $e_{kj} = \max$ . Из полученных стратегий выбирается та, для которой математическое ожидание длины пути проездов за процесс поиска будет минимальным ( $M(\Sigma l) = \min$ ). ТП- $g$  на первом шаге в этой стратегии будет оптимальной. Выбор ТП- $g$  на втором шаге осуществляется прямым перебором ТП, а на последующих шагах по условию  $e_{kj} = \max$ . Сравнение полученных стратегий по  $M(\Sigma l) = \min$  позволяет выбрать оптимальную ТП- $g$  на втором шаге. Дальнейший расчет ведется аналогично. При контрольных расчетах по данному методу во всех случаях была выбрана стратегия, которая заключается в поочередном посещении всех ТП в направлении повреждения. Это относится как к схемам с ТП с одной входящей и одной выходящей линией, так и к схемам с отпайками. Применение такой стратегии приводит к большому увеличению математического ожидания недоотпуска электроэнергии. Поэтому такая стратегия применяется очень редко, чаще всего для поиска повреждения многолучевых схем. Поэтому выбор оптимальной стратегии необходимо вести с помощью критерия, который даст гарантию уменьшения длины пути проезда при небольшом увеличении  $M(\Delta W)$ . Для удовлетворения этих требований поиск поврежденного участка необходимо вести по максимальной скорости включения нагрузки на единицу длины пути проезда. Математическое ожидание этой величины определяется по выражению

$$e_{kj} = \sum_{\nu=1}^M \frac{q_{\nu} m - m_{\nu}}{T_{\nu} L_{\nu}} \sum_{s=1} K_{ps} P_s, \quad (12)$$

где  $L_{\nu}$  - суммарная длина пути проезда на оптимизируемом шаге при повреждении элемента  $\nu$ -го подмножества. Как и в предыдущем случае, более точные результаты дает метод локальной оптимизации с приближенной оценкой на каждом шаге глобального критерия. В качестве глобального критерия применяется

$$\Gamma_k = M(\Delta W) \cdot M(\Sigma L). \quad (13)$$

Расчеты ведутся аналогично предыдущему случаю. Расчеты показывают, что применение этого метода приводит к уменьшению математического ожидания длины пути проездов во время поиска повреждения и восстановления электроснабжения потре-

бителей при относительно небольшом увеличении математического ожидания недоотпуска электроэнергии.

### Л и т е р а т у р а

1. Ничипорович Л.В., Радкевич В.Н. Повышение надежности электроснабжения путем оптимизации процесса поиска повреждения в распределительных сетях. – В кн.: Материалы международной научно-технической конференции. Гливице, 1977, с. 161 – 168.

УДК 537.523.4.621.315.6

К.Ф.Степанчук, канд.техн.наук (БПИ)

### КУМУЛЯТИВНАЯ МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ И УСЛОВИЯ УСКОРЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ИЗОЛЯЦИИ

Модель и основные соотношения. Линейная кумулятивная модель разрушения образцов и материалов предполагает, что скорость разрушения зависит только от воздействия, и дефекты в образце при последовательных воздействиях накапливаются простым суммированием [1]. Предлагаемая модель является следующим приближением к реальности и учитывает ослабление образца при накоплении разрушения. Допустим, в образце изоляции (рис. 1) развивается разрушение  $y(U, t)$  в виде, напри-

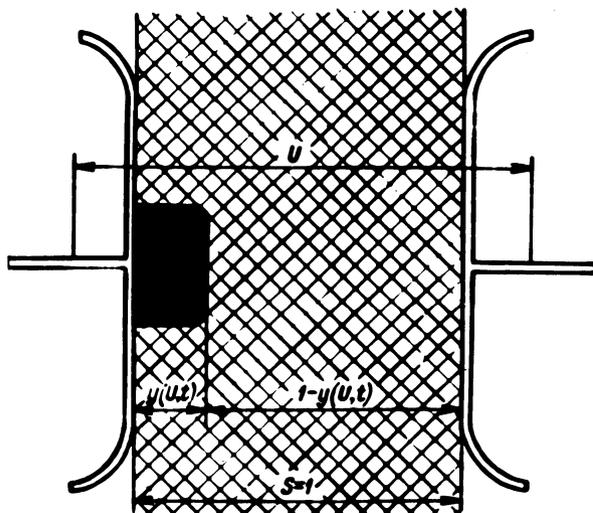


Рис. 1. Развитие разрушения в образце изоляции.

мер, канала с практически нулевым сопротивлением, а скорость разрушения  $x(U, t)$  пропорциональна средней напряженности в здоровой части изоляции в некоторой степени  $m$ , т.е.

$$x(U, t) = AE_{cp}^m(U, t) = A \left[ \frac{U}{1-y(U, t)} \right]^m = A \left( \frac{U}{1-y} \right)^m. \quad (1)$$

Обозначения и условия нормировки приняты такими же, как в [1]. В начале процесса при напряжении  $U = U_0 = \text{const}$

$$x(U_0, 0) = x_0 = AU_0^m. \quad (2)$$

При условиях (1), (2) уравнение разрушения будет иметь вид

$$\frac{\partial y(U_0, t)}{\partial t} = \frac{dy}{dt} = \frac{x_0}{(1-y)^m}. \quad (3)$$

Решение этого уравнения приводит к следующим выражениям:

$$y(U_0, t) = 1 - \left[ 1 - (m+1) x_0 t \right]^{\frac{1}{m+1}}; \quad (4)$$

$$x(U_0, t) = \frac{dy}{dt} = x_0 \left[ 1 - (m+1) x_0 t \right]^{-\frac{m}{m+1}}. \quad (5)$$

При полном разрушении  $y = 1$  и  $t = \tau_0$ . Из соотношений (4) и (2) получим

$$x_0 = \frac{1}{(m+1) \tau_0}; \quad \tau_0 = \frac{1}{(m+1) A U_0^m}. \quad (6)$$

С учетом (6) выражения (4) и (5) преобразуются соответственно к виду

$$y(U_0, t) = 1 - \left(1 - \frac{t}{\tau_0}\right)^{\frac{1}{m+1}} ; \quad (7)$$

$$x(U_0, t) = \frac{1}{(m+1)\tau_0} \left(1 - \frac{t}{\tau_0}\right)^{-\frac{m}{m+1}} . \quad (8)$$

При испытании образца непрерывно нарастающим напряжением  $U(t) = \alpha t$  уравнение разрушения

$$\frac{dy(\alpha, t)}{dt} = A \left[ \frac{\alpha t}{1 - y(\alpha, t)} \right]^m \quad (9)$$

приводит к решению

$$y(\alpha, t) = 1 - \left(1 - A \alpha^m t^{m+1}\right)^{\frac{1}{m+1}} ; \quad (10)$$

$$x(\alpha, t) = A \alpha^m t^m \left(1 - A \alpha^m t^{m+1}\right)^{-\frac{m}{m+1}} . \quad (11)$$

При полном разрушении  $y=1$ ,  $t = \tau_\alpha$  из соотношения (10) вытекает, что

$$A \alpha^m = \frac{1}{\tau_\alpha^{m+1}} . \quad (12)$$

Подставляя (12) в (10) и (11) соответственно получим

$$y(\alpha, t) = 1 - \left[1 - \left(\frac{t}{\tau_\alpha}\right)^{m+1}\right]^{\frac{1}{m+1}} ; \quad (13)$$

$$x(\alpha, t) = \frac{t^m}{\tau_\alpha^{m+1}} \left[1 - \left(\frac{t}{\tau_\alpha}\right)^{m+1}\right]^{-\frac{m}{m+1}} . \quad (14)$$

Ускорение испытаний. Определим меру ускорения разрушения (ускорения испытаний)  $\beta_y = \frac{\tau_1}{\tau_y}$ .

При испытании идентичных образцов непрерывным длительным напряжением ( $U_1 = \text{const}$ ;  $U_y = \text{const}$ ;  $U_y > U_1$ ), используя (6), получим

$$\beta_y = \frac{\tau_1}{\tau_y} = \frac{(m+1)AU_y^m}{(m+1)AU_1^m} = \left(\frac{U_y}{U_1}\right)^m. \quad (15)$$

В случае непрерывного нарастания напряжения с нуля соответственно со скоростью  $\alpha_1$  и  $\alpha_y$  с учетом (12)

$$\beta_y = \frac{\tau_{\alpha_1}}{\tau_{\alpha_y}} = \left(\frac{\alpha_y}{\alpha_1}\right)^{\frac{m}{m+1}}. \quad (16)$$

При этом пробой будет происходить соответственно при напряжениях

$$\frac{U_{п\alpha_y}}{U_{п\alpha_1}} = \frac{\alpha_y \tau_y}{\alpha_1 \tau_1} = \beta_y^{\frac{1}{m}}. \quad (17)$$

При сравнении результатов испытаний, полученных при длительном воздействии  $U_1$  и непрерывном нарастании напряжения со скоростью  $\alpha_y$ , учитывая (6) и (12)

$$\beta_y = \frac{\tau_1}{\tau_{\alpha_y}} = \frac{(A\alpha_y^m)^{\frac{1}{m+1}}}{AU_1^m(m+1)} = \left(\frac{\alpha_y \tau_{\alpha_y}}{U_1}\right)^m \frac{1}{m+1}. \quad (18)$$

Определение кратковременной прочности. Допустим, что кратковременное пробивное напряжение  $U_{п\alpha}$  определяется при непрерывном подъеме напряжения с нуля со скоростью  $\alpha$ . Найдем зависимость  $U_{п\alpha}$  от времени  $t_1$  предварительной выдержки образца под напряжением  $U_1 = \text{const}$ . Уравнение разрушения при этих условиях имеет вид

$$y(U_1, t_1) + y(\alpha, t_\alpha) = 1. \quad (19)$$

Подставляя в (19) выражения для  $y$  (7) и (13) и решая (19) относительно  $U_{п\alpha} = \alpha \cdot t_\alpha$ , получим

$$\frac{U_{п\alpha}}{U_{п\alpha_0}} = \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( 1 - \frac{t_1}{\tau_1} \right)^{\frac{1}{m+1}} \right] \right\}^{\frac{1}{m+1}}, \quad (20)$$

где  $U_{п\alpha_0} = \alpha \cdot \tau_\alpha$  - напряжение пробоя при  $t_1=0$ , т.е. без предварительной выдержки под напряжением.

Нетрудно убедиться, что выражения для  $\beta_y$  (15), (16) и (18) идентичны соответствующим соотношениям, полученным для линейной кумулятивной модели [1]. Расчетное соотношение (20), определяющее снижение кратковременной прочности, например в процессе эксплуатации изоляции, не соответствует выражениям, полученным для линейной кумулятивной модели [2], так как в рассматриваемой модели разрушение происходит с ускорением или замедлением в зависимости от знака  $m$ .

Таким образом, предполагаемая модель позволяет определить не только условия ускорения испытаний образцов и конструкций органической изоляции, для которых известно соотношение  $\tau = VE^{-m}$  [3], но и оценить снижение кратковременной прочности  $\tau_{ср}$  изоляции в процессе ее эксплуатации.

#### Л и т е р а т у р а

1. Степанчук К.Ф. Линейная кумулятивная модель разрушения и примеры ее использования при планировании и анализе испытаний образцов изоляции. - Изв. вузов. Энергетика, 1977, №4, с.124-128.
2. Степанчук К.Ф. Линейная модель разрушения и анализ кратковременной прочности как меры старения изоляции. - Изв. вузов. Энергетика, 1981, №2, с.87-89.
3. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. - Л.: Энергия, 1979, с.81 - 90.

## ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

УДК 621.316.825

В.А.Палагин, канд.техн.наук (БТИ)

### ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СХЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОЗАВИСИМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (ТЗЭ)

При конструировании преобразователей температуры на основе ТЗЭ встает вопрос обеспечения линейной зависимости тока в измерительной ветви от измеряемой температуры.

Ток в относительных единицах в любой ветви электрической схемы преобразователя температуры с одним ТЗЭ можно определить в общем виде выражением [1]:

$$\bar{I}_i(T) = \frac{\bar{R}_{тэ} \alpha + \beta}{\bar{R}_{тэ} + \gamma} \quad (1)$$

Здесь  $\bar{R}_{тэ} = \frac{R_{тэ}(T)}{R_j}$ ;  $\bar{I}_i = \frac{I_i}{U_{ц}/R_j}$ ;  $\alpha = \frac{a_i R_j}{c}$ ;

$$\beta = \frac{b_i}{c}; \quad \gamma = \frac{d}{c R_j},$$

где  $R_j$  - одно из выбранных известным сопротивлением измерительной схемы.

Значения  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c$  и  $d$  определяются для конкретных схем, например, методом эквивалентного генератора. Так, для мостовой схемы рис.1, а значения этих коэффициентов для измерительной цепи ( $R_o$ ) имеют значения ( $R_j = R_3$ ):

$$\left. \begin{aligned} \bar{a}_o &= a_o / R_3 = \bar{R}_4; \quad \bar{b}_o = b_o / R_3^2 = -\bar{R}_2; \\ \bar{c} &= c / R_3^2 = (1 + \bar{R}_1)(\bar{R}_o + \bar{R}_2 + \bar{R}_4) + \bar{R}_4(\bar{R}_o + \bar{R}_2); \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\bar{d} = d/R_3^3 = \bar{R}_1 \left[ \bar{R}_0 (\bar{R}_2 + \bar{R}_4) + (\bar{R}_0 + \bar{R}_2 + \bar{R}_4) \right] + \left. \begin{aligned} &+ \bar{R}_2 \left[ \bar{R}_0 (1 + \bar{R}_4) + \bar{R}_4 \right]. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Разложив функцию  $\bar{I}_1(T)$  в ряд Тейлора, получим линеаризованное значение

$$\bar{I}_{i, \text{лин}}(T) = \bar{I}_1(T_{\text{ср}}) + \bar{I}'_1(T_{\text{ср}}) \cdot (T - T_{\text{ср}}) + \bar{I}_n, \quad (3)$$

где  $T_{\text{ср}}$  - среднее значение температуры линеаризуемого участка зависимости  $\bar{I}_1(T)$ ;  $\bar{I}'_1(T_{\text{ср}})$  - первая производная тока  $\bar{I}_1$  по температуре в точке  $T_{\text{ср}}$ ;  $\bar{I}_n$  - остаточный член, определяющий ошибку разложения.

С целью уменьшения остаточного члена  $\bar{I}_n$ , обеспечим равенство нулю второй производной  $\bar{I}''_1$ . Это одновременно является необходимым условием максимальной температурной чувствительности. Оно определяется на основе уравнения (1) и выражается соотношением

$$\gamma = \frac{\bar{d}}{c} = \left[ \frac{(\bar{R}'_{\text{тэ}})^2}{\bar{R}''_{\text{тэ}}} - \bar{R}_{\text{тэ}} \right]. \quad (4)$$

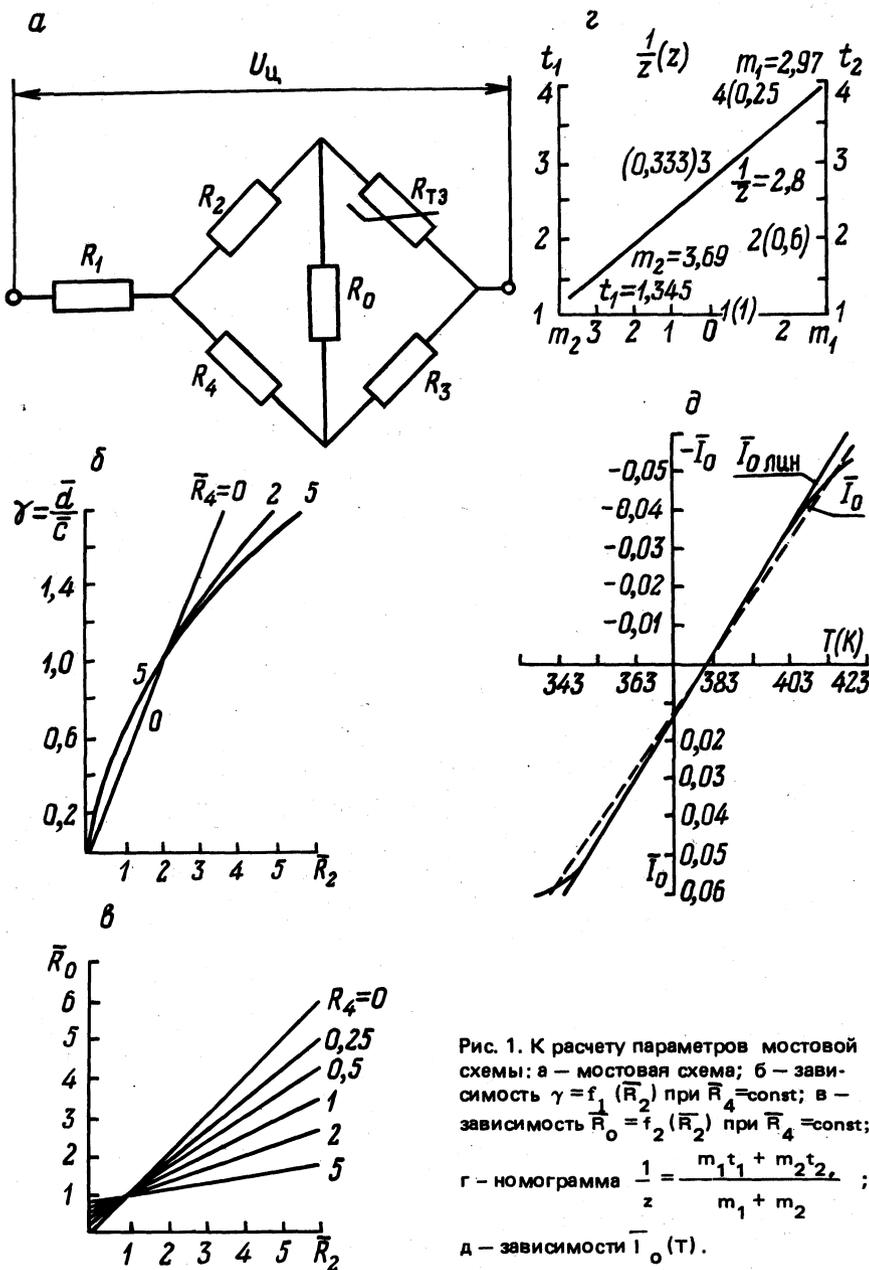
Первая производная  $\bar{I}'_1(T)$  равна

$$\bar{I}'_1(T) = \frac{\gamma \alpha - \beta}{(\bar{R}_{\text{тэ}} + \gamma)^2} \cdot \bar{R}_{\text{тэ}}. \quad (5)$$

Производные  $\bar{R}'_{\text{тэ}}$  и  $\bar{R}''_{\text{тэ}}$  определяются по известным выражениям  $\bar{R}_{\text{тэ}}(T)$  для конкретных элементов и, например, для термистора равны

$$\begin{aligned} \bar{R}_{\text{тэ}} &= \frac{R_\infty}{R_j} \exp \frac{B}{T}; \quad \bar{R}'_{\text{тэ}} = -\frac{B}{T^2} \bar{R}_{\text{тэ}}; \quad \bar{R}''_{\text{тэ}} = \\ &= \frac{B}{T^3} \left( \frac{B}{T} + 2 \right) \bar{R}_{\text{тэ}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Рассмотрим задачу линеаризации зависимости тока в измерительной диагонали мостовой схемы (рис.1,а) от темпера-



туры. В качестве сопротивления  $R_j$  примем сопротивление  $R_3$ . Соотношение  $\gamma$  определяется выражением

$$\gamma = \frac{\bar{R}_1 [\bar{R}_0 (\bar{R}_2 + \bar{R}_4) + (\bar{R}_0 + \bar{R}_2 + \bar{R}_4)] + \bar{R}_2 [\bar{R}_0 (1 + \bar{R}_4) + \bar{R}_4]}{(1 + \bar{R}_1) (\bar{R}_0 + \bar{R}_2 + \bar{R}_4) + \bar{R}_4 (\bar{R}_0 + \bar{R}_2)},$$

где

$$\bar{R}_1 = R_1 / R_3; \bar{R}_2 = R_2 / R_3; \bar{R}_4 = R_4 / R_3; \bar{R}_0 = R_0 / R_3.$$

Нетрудно показать, что условием наилучшего использования мощности ТЭЭ (т.е. условием максимума  $\frac{P_{\text{изм}}}{P_{\text{тэ}}}$ ) является равенство

$$\bar{R}_0 = \frac{\bar{R}_2 / \bar{R}_4 + 1}{1 / \bar{R}_4 + 1} \quad (7)$$

С учетом (7)

$$\gamma = \frac{\bar{R}_1 (\bar{R}_2 + \bar{R}_4) \left( 2 + \frac{\bar{R}_2}{1 + \bar{R}_4} \right) + \bar{R}_2 (\bar{R}_2 + 2\bar{R}_4)}{(1 + \bar{R}_1) (\bar{R}_2 + \bar{R}_4) \left( 1 + \frac{1}{1 + \bar{R}_4} \right) + \bar{R}_4 \left( \frac{\bar{R}_2 + \bar{R}_4}{1 + \bar{R}_4} + \bar{R}_2 \right)} \quad (8)$$

На рис.1,б приведена зависимость  $\gamma = f_1(\bar{R}_2)$  при  $\bar{R}_1 = 0$  и  $\bar{R}_4 = \text{const}$ , а на рис.1,в функция  $\bar{R}_0 = f_2(\bar{R}_2)$  при  $\bar{R}_4 = \text{const}$ .

Поскольку в выражении  $\bar{I}_i'$  (Т) входит соотношение

$$\gamma \alpha - \beta = z, \quad (9)$$

то для облегчения выбора параметров измерительной схемы целесообразно построить номограмму  $z$  в функции параметров мостовой схемы. Для этого, подставив значения  $\gamma$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  (при  $R_1 = 0$ ), приведем уравнение (7) к виду

$$\frac{1}{z} = \frac{\gamma \bar{R}_4 \cdot 2/\gamma + \bar{R}_2 (2 + \bar{R}_4)}{\gamma \bar{R}_4 + \bar{R}_2} \quad (10)$$

### Имяли обозначения

$$m_1 = \gamma \bar{R}_4; m_2 = \bar{R}_2; t_1 = \frac{2}{\gamma}; t_2 = 2 + \bar{R}_4,$$

перепишем (9) в виде

$$\frac{1}{z} = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2}{m_1 + m_2}. \quad (11)$$

В [2] показано, что зависимость (11) может быть представлена в виде номограммы с двумя бинарными полями в системе выраженных точек (рис.1,г).

Таким образом, пользуясь номограммами рис.1,а,б,в,г, можно достаточно просто выбрать параметры измерительной схемы, обеспечивающие линейную зависимость  $\bar{I}_0(T)$ .

Пример. Требуется спроектировать мостовую схему с линейной зависимостью тока в измерительной диагонали от температуры. Температурный интервал  $\pm 50^\circ$  со средним значением температуры  $T_{cp} = 373K$ . В качестве ТЗЭ принять термистор КМТ-14,  $R_{20} = 74 \text{ кОм}$ ,  $B=3855 K$ ,  $R_\infty = 0,143 \text{ Ом}$ . Примем  $R_1 = 0$ .

Порядок расчета

1. Определим значение  $\gamma$  для температуры  $T_{cp}$ , пользуясь выражениями (4) и (6):

$$\gamma = \frac{\bar{d}}{c} = \left[ 2 \frac{B/T_{cp}}{B/T_{cp} + 2} - 1 \right] \bar{R}_{тэ.ср} = 0,676 \bar{R}_{тэ.ср}$$

Выбрав

$$\begin{aligned} \bar{R}_{тэ.ср} &= \frac{R_{тэ}(T_{cp})}{R_3} = 2,2 \left( R_3 = \frac{0,143 \exp(3855/373)}{2,2} = \right. \\ &= 2000 \text{ Ом}), \end{aligned}$$

находим  $\gamma = 1,487$ .

2. Приняв  $\bar{R}_4 = 2$  (т.е.  $R_4 = \bar{R}_4 \cdot R_3 = 4000 \text{ Ом}$ ) по графику рис. 1,а, находим  $\bar{R}_2 = 3,59$  (т.е.  $R_2 = \bar{R}_2 R_3 = 7180 \text{ Ом}$ ).

3. По найденным значениям  $\bar{R}_2$  и  $\bar{R}_4$ , пользуясь выражением (7) или рис. 1, в, находим  $\bar{R}_0 = 1,86$  (т.е.  $R_0 = \bar{R}_0 \times R_3 = 3720 \text{ Ом}$ ).

Отметим, что при заданном сопротивлении нагрузки  $R_0$  расчет целесообразно начинать с определения соотношений  $\bar{R}_2$  и  $\bar{R}_4$  по графикам рис. 1,б. Далее находится значение  $\gamma$ , соответствующее выбранным значениям  $\bar{R}_2$  и  $\bar{R}_4$  (по графикам рис. 1,б) и, наконец, определяется  $\bar{R}_3$ .

4. Используя номограмму рис.1,г для найденных значений  $\gamma$ ,  $\bar{R}_2$  и  $\bar{R}_4$ , определяем  $\frac{1}{z}$  ( $m_2 = \bar{R}_2 = 3,59; t_1 = \frac{2}{\gamma} = 1,345; m_1 = \gamma \bar{R}_4 = 2,974; t_2 = 2 + \bar{R}_4 = 4$ ). Оно равно  $\frac{1}{z} = 2,8$  или  $z = 0,357$ .

5. Рассчитываем значение  $\bar{T}'_0(T_{cp})$ , определяющее угол наклона линеаризованной зависимости  $\bar{T}_i$  лин. (T) =  $\bar{T}_{0.лин}(T)$  (в соответствии с выражениями (5), (6), (9)У):

$$\bar{T}'_0(T_{cp}) = -z \frac{B}{T^2} \cdot \frac{\bar{R}_{тэ.ср}}{(\bar{R}_{тэ.ср} + \gamma)^2} = -0,357 \frac{3855}{373^2} \times \frac{2,2}{(2,2+1,487)^2} = -0,0016.$$

6. Определяем  $\bar{T}_i(T_{cp}) = \bar{T}_0(T_{cp})$ , пользуясь уравнением (1). Предварительно найдем

$$\alpha = \frac{\bar{a}_0}{c} = \frac{2}{(1,86+3,59+2)+2(1,86+3,59)} = 0,109;$$

$$\beta = \frac{\bar{b}_0}{c} = -0,196.$$

Тогда  $\bar{T}_0(T_{cp}) = \frac{2,2 \cdot 0,109 - 0,196}{2,2 + 1,487} = 0,012$ .

7. Записываем уравнение линеаризованной зависимости (на основе (3)):

$$\bar{T}_{0.лин}(T) = \bar{T}_0(T_{cp}) + \bar{T}'_0(T_{cp}) \cdot (T - T_0) = 0,012 - 0,0016(T - T_{cp}).$$

На рис. 1,д приведены расчетные значения зависимости тока через измерительную диагональ мостовой схемы от температуры  $\bar{I}_o(T)$  и соответствующая ей линейаризованная зависимость  $\bar{I}_{o,лин}$ .

Погрешность при температуре 423К составит 14%.

Точность линейаризации может быть повышена, если действительную зависимость  $\bar{I}_o(T)$  аппроксимировать прямой, пересекающейся с действительной, например, при  $T = 413$  К. Угол наклона в этом случае определится выражением

$$\frac{\bar{I}_o(413) - \bar{I}_o(T_{ср})}{413 - T_{ср}} = - 0,00147.$$

Линейаризованное уравнение при этом принимает вид

$$\bar{I}_{o,лин}(T) = 0,012 - 0,00147(T - T_{ср}).$$

Погрешность при  $T=423$ К составит 4,9%.

При уменьшении диапазона измеряемых температур погрешность существенно уменьшается (при измерении температур в диапазоне  $\pm 20^\circ$  от  $T_{ср}$  погрешность линейаризации составляет доли процента).

#### Л и т е р а т у р а

1. Волошин И.Ф., Палагин В.А. Переходные процессы в цепях с термисторами. - Минск: Наука и техника, 1967, с. 72.
2. Франк М.Л. Номографический справочник. - М.: ГТГИ, 1933, с.17.

УДК 621.314.632

В.Г.Черномашенцев, канд.техн.наук, В.А.Пацкевич, инженер  
(БИИЖТ)

#### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СТАБИЛИЗИРОВАННОМ ИНВЕРТОРЕ

Широкому внедрению в промышленность индукционного нагрева токами высокой частоты способствует разработка новых источников питания, наиболее полно отвечающих требованиям, предъявляемым технологией к индукционной нагревательной ус-

тановке. В частности, необходимо, чтобы источник питания был способен работать на нагрузку с переменными электрическими параметрами. В [1] показано, что в таких установках целесообразно применять автономные тиристорные последовательные инверторы со стабилизирующими диодами.

В данной статье рассматривается новый полумостовой инвертор со стабилизацией внутренних токов и напряжений с помощью диодов, принципиальная схема которого изображена на рис. 1. Работу инвертора в установившемся режиме рассмотрим с момента включения тиристора  $V1$ . Открытие  $V1$  приводит к возникновению тока в цепи, образованной коммутирующим конденсатором  $C3$ , нагрузкой  $Z_H$ , конденсатором фильтра  $C1$ , коммутирующим дросселем  $L1$ .

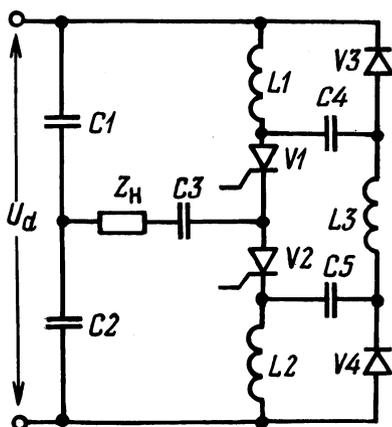


Рис. 1 Схема стабилизированного инвертора.

Параметры цепи выбраны такими, что ток в ней носит колебательный характер. Так как емкость  $C1$  значительно больше  $C3$ , то форма тока определяется в основном параметрами  $Z_H$ ,  $L1$  и  $C3$ . После достижения током максимального значения напряжение на  $L1$  меняет полярность и в некоторый момент времени становится больше напряжения на конденсаторе фильтра  $C4$ , что приводит к открытию диода  $V3$ . Одновременно происходит выключение  $V1$  и прекращение подзаряда  $C3$  вследствие снижения до нуля анодного тока. Вступление в работу  $V3$  приводит к тому, что часть электромагнитной энергии дросселя  $L1$  передается конденсатору  $C4$ , а с него в сеть. Величина этой энергии зависит от параметров колебательной цепи инвертора и будет максимальна при коротком замыкании нагрузки. Конденсатор  $C4$  разряжается током, протекающим через дроссель фильтра  $L3$ .

Диод  $V_3$  закрывается, когда иссякнет запас электромагнитной энергии в  $L_1$ . Затем включается тиристор  $V_2$  и в цепи  $C_3 - Z_H - C_2 - L_2 - V_2$  начинает протекать ток. Далее включается  $V_4$  и часть электромагнитной энергии дросселя  $L_2$  передается конденсатору фильтра  $C_5$  через диод  $V_4$ . Таким образом, процессы, происходящие в схеме инвертора при включении второго тиристора, аналогичны уже описанным выше. Следует отметить, однако, что при включении  $V_2$  ток через нагрузку протекает в противоположном, относительно первого случая, направлении. С выключением  $V_4$  завершается цикл работы схемы.

Из описания принципа работы инвертора видно, что весь цикл его работы можно разделить на четыре интервала. На протяжении каждого структура схемы инвертора не меняется, что позволяет упростить математическое отображение электромагнитных процессов внутри отдельных интервалов. Начинается цикл с интервала проводимости  $V_1$ , за которым следует интервал проводимости  $V_3$ . С включением  $L_2$  имеем третий интервал, за которым следует интервал проводимости  $V_4$ .

Так как процессы на первых двух интервалах подобны процессам, протекающим в схеме инвертора на третьем и четвертом, то достаточно рассмотреть только первую половину цикла. При анализе электромагнитных процессов принято, что тиристоры и диоды являются идеальными элементами, нагрузка носит активный характер, активная мощность выделяется только в нагрузке, емкость конденсаторов фильтра значительно больше емкости коммутирующего конденсатора и индуктивность дросселя фильтра значительно больше индуктивности коммутирующих дросселей. Исследования проведены для случая, когда частота собственных колебаний коммутирующей цепи инвертора равна частоте включения тиристоров.

На рис. 2,а изображена эквивалентная схема замещения инвертора для первого расчетного интервала. Дополнительные эдс отображают начальное напряжение  $U_{co}$  на коммутирующем конденсаторе емкостью  $C$  и начальный ток  $i_{co}$  в коммутирующем дросселе индуктивностью  $L$ , который равен постоянному току дросселя фильтра  $I_d$ , учитываемому генератором тока.

Для колебательного режима работы схемы первого интервала имеем

$$i_H(t) = \frac{U_d + 2U_{co}}{2\omega L} e^{-\delta t} \sin \omega t, \quad (1)$$

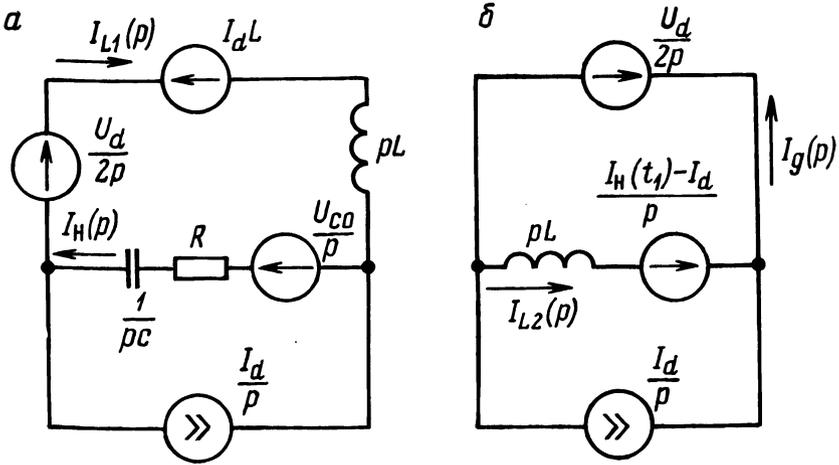


Рис. 2. Схема замещения инвертора: а – для первого интервала; б – для второго интервала.

где  $\omega = \sqrt{\omega_o^2 - \delta^2}$ ;  $\omega_o^2 = \frac{1}{LC}$ ;  $\delta^2 = \frac{R^2}{4L^2}$ ;

$U_d$  – величина напряжения источника питания.

С учетом (1) напряжение на коммутирующем дросселе

$$u_L(t) = \frac{U_d + 2U_{co}}{2} e^{-\delta t} (\cos \omega t - \frac{\delta}{\omega} \sin \omega t); \quad (2)$$

на коммутирующем конденсаторе

$$u_C(t) = \frac{U_d}{2} - \left( \frac{U_d + 2U_{co}}{2} \right) e^{-\delta t} \left( \cos \omega t + \frac{\delta}{\omega} \sin \omega t \right). \quad (3)$$

Завершается первый интервал в момент времени  $t_1$ , когда напряжение на коммутирующем дросселе станет равным  $-0,5U_d$ , т.е. когда оно сравняется с напряжением на конденсаторе фильтра С4 (рис. 1). Для этого момента времени можно записать

$$U_d = \left( U_d + 2U_{co} \right) e^{-\delta t_1} \left( \frac{\delta}{\omega} \sin \omega t_1 - \cos \omega t_1 \right). \quad (4)$$

На рис. 2,б приведена эквивалентная схема замещения инвертора на втором интервале, для которого справедливо

$$i_{L2}(t) = I_H(t_1) - I_d - \frac{U_d}{2} t; \quad (5)$$

$$i_g(t) = I_H(t_1) - \frac{U_d}{2L} t, \quad (6)$$

где  $i_g(t)$  - ток диода.

На втором интервале энергии  $W_L$ , запасенная на коммутирующем дросселе, возвращается источнику питания. Величина ее

$$W_L = \frac{U_d}{2} \int_0^{t_2} i_g(t) dt, \quad (7)$$

где  $t_2$  - длительность интервала проводимости диода.

Зная, что второй интервал завершается в момент выключения диода, то, приравняв к нулю (6), определяем длительность этого интервала

$$t_2 = \frac{2L I_H(t_1)}{U_d}. \quad (8)$$

С учетом (6) и (8) после интегрирования (7) получаем

$$W_L = \frac{L I_H^2(t_1)}{2} = I_d U_d \frac{\pi}{\omega},$$

откуда 
$$I_d = \frac{L I_H^2(t_1)}{2 U_d} \frac{\omega}{\pi}. \quad (9)$$

В процессе перезаряда коммутирующего конденсатора от  $-U_{CO}$  до  $+U_{CO}$  на первом интервале энергии, поступающая от источника питания, распределяется между нагрузкой и коммутирующим дросселем

$$\frac{U_d}{2} \int_0^{t_1} i_{L1}(t) dt = \frac{L I_{L1}^2(t_1)}{2} + R \int_0^{t_1} i_H^2(t) dt. \quad (10)$$

Введя обозначения

$$\cos \alpha = \frac{d}{2} = \frac{\delta}{\omega_0}; \sin \alpha = \frac{\omega}{\omega_0}; \operatorname{tg} \beta = \frac{\delta}{\omega}; U_{co}^* = \frac{U_{co}}{U_d},$$

где  $d$  - затухание колебательной цепи инвертора, после интегрирования получим (4) и (10) в виде

$$\sin^2 \alpha = (1 + 2U_{co}^*) e^{-\delta t_1} \sin(\omega t_1 - \alpha); \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sin^2 \alpha - e^{-\delta t_1} \sin \alpha \sin(\omega t_1 + \alpha) = \\ = \frac{1 + 2U_{co}}{2} [\cos \alpha e^{-2\delta t_1} \sin(2\omega t_1 - \beta) - \\ - e^{-2\delta t_1} (\cos \omega t_1 - \frac{\omega t_1}{2\pi} \sin^2 \omega t_1) + \sin^2 \alpha]. \end{aligned} \quad (12)$$

Время  $t_B$ , предоставляемое на восстановление тиристорами управляющих свойств, в данном инверторе складывается из длительности паузы в кривой тока нагрузки и времени  $t_3$ , прошедшему между моментом включения противофазного тиристора и моментом появления положительного напряжения на закрытом тиристоре

$$\omega t_B = \pi - \omega t_1 + \omega t_3.$$

Положительный потенциал на аноде закрытого тиристора возникает при снижении суммарного напряжения на нагрузке и коммутирующем конденсаторе до значения  $0,5 U_d$ . Принимая во внимание отмеченные обстоятельства и учитывая (1), (3), можно составить следующую зависимость, из которой определяем  $\omega t_3$  при изменении затухания  $d$ :

$$d = \frac{\sin(\omega t_3 + \alpha)}{\sin \omega t_3}. \quad (13)$$

Зависимости (11), (12), (13) позволяют с помощью ЭВМ выполнить расчет процессов в инверторе и получить требуемые характеристики. Ниже рассматривается влияние  $d$  на максимальное напряжение на коммутирующем конденсаторе и тиристорах.

В результате анализа электромагнитных процессов установлено, что при изменении  $d$  от нуля до 0,66 отношение максимального напряжения на коммутирующем конденсаторе к величине напряжения источника питания уменьшается на 25%, что видно из рис. 3. Для сравнения можно отметить, что согласно [1] увеличение затухания от 0,2 до 0,6 в полумостовом инверторе без стабилизирующих диодов приводит к изменению относительного напряжения на коммутирующем конденсаторе от 3,2 до единицы. Из-за значительной величины напряжения на элементах полумостовой инвертор без диодов не может работать при малых значениях сопротивления нагрузки. В то же время исследуемый стабилизированный инвертор сохраняет работоспособность и при коротком замыкании нагрузки. При этом максимальное напряжение на тиристорах инвертора не превышает величины  $U_d$ .

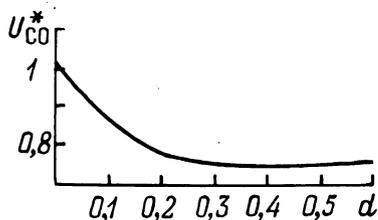


Рис. 3. Зависимость напряжения на коммутирующем конденсаторе от затухания.

В заключение отметим, что с введением в схему полумостового инвертора стабилизирующих диодов максимальное напряжение на коммутирующем конденсаторе и тиристорах при любом сопротивлении нагрузки не превышает величины  $U_d$ . Данное свойство разработанного инвертора позволяет использовать его в тиристорных преобразователях частоты, работающих на переменную нагрузку. В частности, он может успешно применяться в индукционных электротермических установках.

#### Л и т е р а т у р а

1. Тиристорные преобразователи высокой частоты./Е.Н.Беркович, Г.В.Ивенский, В.С.Иоффе. - Л.: Энергия, 1973, с.153.

В.В.Прокопчик, канд. техн. наук,  
Г.И.Селиверстов, инженер, Г.Л.Духович, инженер  
(Гомельский политехнический институт)

## О КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СВЯЗИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Современный металлургический завод является предприятием с высокой степенью электрификации. Электровооруженность на одного работающего доходит до 60–80 тыс. кВт·ч в год и на один отработанный чел.–ч – до 40 кВт·ч. Получасовой максимум нагрузки многих заводов превосходит 100 МВт, достигая 600–700 МВт. Электрическое хозяйство завода образуют десятки опорных подстанций с высшим напряжением 110 кВ, 220 кВ; сотни распределительных трансформаторных подстанций, где установлены тысячи трансформаторов; десятки тысяч электродвигателей.

Для оценки эффективности сформировавшегося электрического хозяйства предприятий черной металлургии с 1976 г. в отрасли введена система основных электрических показателей.

К основным электрическим показателям промышленного предприятия отнесены: заявленный в часы прохождения максимума в системе получасовой максимум нагрузки  $P_M$  и годовое число часов использования максимума  $T$ , которые характеризуют потребности предприятия в электроэнергии и определяют ее функционально; количество установленных электрических машин  $n$  и средняя мощность двигателя  $P_{CP}$  (условный электродвигатель), которые составляют "костяк" электрического хозяйства, диктуют в определенной степени его структуру, определяют численность электротехнического персонала и саму постановку вопроса о технической базе системы обслуживания; коэффициент спроса  $K_C$ ; электровооруженность труда  $A_T$ ; производительность электротехнического персонала  $A_Э$  [1].

Анализ отчетных данных по основным электрическим показателям металлургических предприятий показывает значительное их различие даже для предприятий и производств с одинаковой технологией и номенклатурой выпускаемой продукции. Установлено также явление низкой загрузки основного электрооборудования предприятий. Например, загрузка трансформаторов опорных подстанций равна 30–50% и, как правило, ниже расчетной. Среднегодовая загрузка трансформаторов, в основном обеспечи-

вающих связь предприятий с энергосистемами, составляет 25-40%, что вдвое ниже директивной [2].

Внедренная система электрических показателей дала возможность установить на основании обработки и анализа отчетно-статистического материала общую динамику (тенденцию) развития электрического хозяйства как отдельного металлургического завода, так и предприятий отрасли в целом. Так, в [3] при исследовании 31 металлургического завода с близкой технологией выяснено, что мощность установленных трансформаторов 1-3 габаритов и электродвигателей коррелируема с получасовым максимумом нагрузки и зависимости между ними линейны.

Определим связи и установим зависимости между получасовым максимумом нагрузки, количеством и мощностью установленных трансформаторов и электродвигателей, между другими электрическими показателями, степень загрузки трансформаторов и электродвигателей, величину их средней мощности на примере исследования группы украинских металлургических предприятий с различной технологией и номенклатурой выпускаемой продукции по данным табл. 1, представленным институтом ГИПРОМЕЗ (г. Москва).

В табл. 1 приняты следующие обозначения:  $n_{т4-5}$ ,  $S_{т4-5}$  и  $n_{т, 1-3}$ ,  $S_{т, 1-3}$  - количество и мощность установленных трансформаторов 4-5 и 1-3 габаритов;  $n_{д}$ ,  $P_{д}$  - количество и мощность всех установленных электродвигателей, включая двигатели переменного и постоянного тока.

Для нахождения зависимостей, которые имеют практический смысл и приведены в табл. 2 (графа 2), был использован математический аппарат теории вероятностей. Определение средних арифметических, среднего квадратичного отклонений, коэффициента корреляции и корреляционного отношения велись по известным формулам с применением ЭВМ ЕС-1020.

Зависимость между показателями была выражена уравнениями

$$y = a + bx; \quad (1)$$

$$y = a + bx + cx^2. \quad (2)$$

Параметры  $a$ ,  $b$ ,  $c$  (коэффициенты регрессии) определены с помощью метода наименьших квадратов с использованием правила Крамера.

Гипотеза о линейности регрессии и о значимости коэффициентов корреляции (табл. 2) для всех исследуемых зависимостей подтвердилась и результаты расчета по уравнению (2) не приводятся. Результаты расчета параметров  $a$ ,  $b$  уравнения (1)

Таблица 1.

Сводные электрические показатели по группе  
украинских металлургических предприятий за 1973 г.

Шифр пред- прия- тия	Получа- емой макси- мум на- грузки, МВт	Силовые трансформаторы				Электро- двигатели	
		$n_{т,4-5}$ шт.	$S_{т,4-5}$ МВА	$n_{т,1-3}$ шт.	$S_{т,1-3}$ МВА	$n_{д}$ шт.	$P_{д}$ МВт
001	406	29	1205,0	702	651,0	47407	1993,3
002	273	38	981,9	546	406,8	40873	1135,2
003	216	11	884,8	294	240,9	24453	853,4
004	190	9	299,0	135	106,5	16456	521,7
005	186	14	418,1	325	254,0	22760	764,4
006	161	19	295,0	231	160,0	17829	435,2
007	140	7	366,0	170	164,4	10950	505,9
008	110	10	249,5	178	139,3	13364	491,5
009	22	2	40,0	107	81,7	7316	207,4
010	Нет све- дений	2	40,0	91	68,0	8354	243,1
011	17	2	40,0	42	29,7	3359	75,0
012	16	2	50,0	44	34,3	5984	69,3
013	14	-	-	31	13,8	2240	47,4
014	Нет све- дений	2	20,0	35	13,5	1260	10,6
015	2	-	-	17	12,6	317	4,5

Таблица 2.

Значения коэффициентов корреляции и регрессии  
для исследуемых зависимостей

Графы	Зависимость	Коэффициент корреляции	Коэффициент регрессии	
			a	b
(3)	$S_{т,1-3} = f(P_M)$	0,944	-13,490	1,410
(4)	$n_{т,1-3} = f(P_M)$	0,944	0,530	1,608
(5)	$P_{д} = f(P_M)$	0,969	-46,929	4,401
(6)	$S_{т,4-5} = f(P_M)$	0,921	-78,993	2,935
(7)	$S_{т,1-3} = f(P_{д})$	0,990	0,681	0,324
(8)	$n_{т,1-3} = f(n_{д})$	0,986	-11,542	0,014

приведены в табл. 2. Значение коэффициента регрессии  $b$ , оцениваемого по  $t$ -критерию, существенно для всех зависимостей (3)–(8), см. табл. 2.

Анализ полученных результатов приводит к следующему. Учитывая, что в максимальной нагрузке завода нагрузка электродвигателей составляет порядка 30%, а зависимость (3), представленная в табл. 2, линейна, можно сделать вывод о значительном недоиспользовании трансформаторных мощностей на предприятиях отрасли, поскольку трансформаторы 1–3 габаритов питают в основном двигательную нагрузку. При нормативной загрузке 0,7 получаем фактическую 0,27, которая получается из соотношения роста  $P_M$  и  $S_{T,1-3}$  при  $b = 1,401$ , или недоиспользованная мощность порядка 60%. Загрузка трансформаторов 4–5 габаритов, обеспечивающих связь предприятий с энергосистемами, по табл. 2, гр. (6), составляет среднюю фактическую 0,34 или недоиспользованную мощность порядка 50%.

При значительной недогрузке установленных трансформаторов 1–3 габаритов очевидно также [табл. 2, гр. (7)] большая степень недоиспользования двигательных мощностей, поскольку на единицу установленной двигательной нагрузки приходится 0,324 единицы установленной мощности трансформаторов.

Средний коэффициент спроса, определяемый как отношение максимальной нагрузки к установленной мощности электроприемников, определим из табл. 2, гр. (5) по формуле

$$k_c = \frac{P_M}{k_T P_D}$$

где  $k_T$  – коэффициент технологической нагрузки, среднее значение которого для исследуемых предприятий равно 1,07.

Подставляя вместо  $P_M$  – 1 МВт, а вместо  $P_D$  – 4,401 МВт, получим  $k_c = 0,212$ , что вдвое ниже рекомендованных и принимаемых системой институтов Тяжпромэлектропроект.

Средняя мощность условного трансформатора 1–3 габарита с ростом  $P_M$  величины устойчива и составляет по данным табл. 1 700–900 кВА. Средняя мощность условного двигателя растет с ростом  $P_M$ . Для мелких предприятий ( $P_M < 30$  МВт) она равна 17,8 кВт, для крупных ( $P_M > 100$  МВт) – 34,6 кВт. Эта же тенденция характерна и для двигателей переменного и постоянного тока, сведения о которых в работе не приводятся.

#### Л и т е р а т у р а

1. Кудрин Б.И. Оценка электрического хозяйства металлургического предприятия. – Промышленная энергетика, 1978,

№ 7, с. 5–8. 2. Кудрин Б.И. О некоторых проблемах исследования электрического хозяйства металлургических предприятий. – В кн.: Электрификация металлургических предприятий Сибири. Томск: ТГУ, 1978, вып. 4, с. 7–72. 3. Ульзитов О.В., Кудрин Б.И. О прогнозировании некоторых параметров электрического хозяйства металлургических заводов. – В кн.: Электрификация металлургических предприятий Сибири. Томск: ТГУ, 1974, вып. 2, с. 108–111.

УДК 62–83:621.9

Г.И.Гульков, аспирант (БПИ)

## ЗАКОН УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА

Совершенствование технологии изготовления изделий, получение точных литых, штампованных и других заготовок обусловило расширение применения процесса шлифования в машиностроении. Достижение высокой эффективности этого процесса обеспечивается повышением точности шлифовальных станков, что достигается в частности увеличением их виброустойчивости. Для обеспечения высокой чистоты и точности формы обрабатываемых поверхностей уровень вибраций должен сохраняться на заданном минимальном уровне. Снижение вибраций шлифовальных станков может быть достигнуто как повышением степени устойчивости системы станок – приспособление – инструмент – деталь (СПИД) (повышением жесткости, изменением подачи, глубины резания и т. д.), так и устранением возмущающих воздействий [1]. Для уменьшения вибраций на шлифовальных станках в адаптивных системах, как правило, прибегают к уменьшению величины подачи, что снижает производительность станка. Поэтому целесообразно рассмотреть возможность уменьшения уровня вибраций путем воздействия на асинхронный электродвигатель (АД) привода шлифовального круга, который является одним из источников их возникновения, так как на продольно-шлифовальном станке шпиндель и АД конструктивно объединены и вибрации АД непосредственно передаются шлифовальному кругу. Уменьшение вибраций собственно АД привода шлифовального круга дает возможность увеличить величину подачи при заданном уровне вибраций шлифовального станка и тем самым повысить производительность

шлифования. Источниками вибрации водоохлаждаемого АД являются: электромагнитные силы, подшипники, механическая несбалансированность ротора. Имея в виду, что для шлифовальных станков используются прецизионные подшипники, небаланс ротора встраиваемого двигателя сводится до минимума, остановимся на электромагнитных вибрациях. Величина удельной радиальной силы, действующей на единицу поверхности воздушного зазора определяется выражением [2]

$$F_{\text{уд}} = 0,4 \cdot 10^6 \cdot B_{\delta}^2(\theta, t), \quad (1)$$

где  $B_{\delta}$  – мгновенное значение магнитной индукции в воздушном зазоре в точке, удаленной на угол  $\theta$  от начала координат в момент времени  $t$ .

В шлифовальных станках АД привода шлифовального круга работает с различной нагрузкой, которая зависит от режима работы станка (черновое или чистовое шлифование, правка круга). Электромагнитный момент АД пропорционален магнитному потоку

$$M = C \cdot \Phi \cdot I_2 \cos \varphi_2,$$

где  $C$  – постоянный коэффициент;  $\varphi_2$  – угол сдвига между током и э. д. с. ротора.

Следовательно, при уменьшении момента нагрузки на валу АД можно уменьшить магнитный поток. Согласно (1) уменьшение потока вызовет уменьшение амплитуды радиальной силы, т. е. возмущающего воздействия, действующего на систему СПИД. Уровень снижения потока ограничивается номинальными потерями мощности в АД, так как для любых режимов работы электродвигателя необходимо, чтобы температура его частей не превосходила предельно допустимого значения. Определим закон изменения напряжения статора АД в функции электромагнитного момента при постоянстве потерь в машине, равных номинальным. Потери мощности в двигателе имеют следующие составляющие

$$\Delta P = \Delta P_{\text{э}1} + \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{э}2} + \Delta P_{\text{мх}}, \quad (2)$$

где  $\Delta P_{\text{э}1}$ ,  $\Delta P_{\text{э}2}$  – электрические потери в обмотках статора и ротора соответственно;  $\Delta P_{\text{с}}$  – потери в стали статора;  $\Delta P_{\text{мх}}$  – механические потери.

Добавочными потерями и потерями в стали ротора пренебрегаем.

Рассмотрим составляющие потерь. На основании Т-образной схемы замещения АД [3] (с учетом общепринятых допущений: параметры машины постоянны, фазные обмотки симметричны, потерями в стали пренебрегаем) можно записать:

$$I_1 = \frac{U_1 \sqrt{(x_0 + x_2')^2 + (\frac{r_2'}{s})^2}}{A}; \quad (3)$$

$$I_0 = \frac{U_1 \sqrt{x_2'^2 + (\frac{r_2'}{s})^2}}{A}; \quad (4)$$

$$I_2' = \frac{U_1 \cdot x_0}{A}, \quad (5)$$

где  $U_1$  - фазное напряжение статора;  $x_1, r_1, x_0, x_2', r_2'$  - параметры схемы замещения;  $s$  - скольжение двигателя;

$$A = \sqrt{\left[ r_1 (x_0 + x_2') + (x_1 + x_0) \frac{r_2'}{s} \right]^2 + \left[ r_1 \frac{r_2'}{s} - x_1 \cdot x_2' - x_0 (x_1 + x_2') \right]^2},$$

$$\Delta P_{\text{э}1} = m_1 \cdot r_1 \cdot I_1^2 = \frac{U_1^2 \cdot m_1 \cdot r_1 \cdot \left( \sqrt{(x_0 + x_2')^2 + (\frac{r_2'}{s})^2} \right)^2}{A^2}; \quad (6)$$

$$\Delta P_{\text{э}2} = m_1 \cdot r_2' \cdot I_2'^2 = \frac{U_1^2 \cdot m_1 \cdot r_2' \cdot x_0^2}{A^2}. \quad (7)$$

Известно также, что

$$\Delta P_{\text{э}2} = S \cdot M \cdot \omega_{\text{Он}}, \quad (8)$$

где  $M$  - электромагнитный момент двигателя;  $\omega_{\text{Он}}$  - угловая скорость поля двигателя.

Разделив (5) на (6) и подставив в полученное выражение (7), после преобразований получим

$$\Delta P_{\text{э}1} = SM \left( K_1 + \frac{K_2}{s} \right), \quad (9)$$

где  $K_1 = \omega_{\text{Он}} \frac{r_1}{r_2} \left( 1 + \frac{x_2'}{x_0} \right)^2$ ;  $K_2 = \omega_{\text{Он}} \frac{r_1 \cdot r_2'}{x_0^2}$ .

Потери в стали статора

$$\Delta P_{\text{с}} = \Delta P_{\text{сн}} \left( \frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2, \quad (10)$$

где  $\Delta P_{\text{сн}}$  - номинальные потери в стали статора;  $\Phi, \Phi_{\text{н}}$  - текущее и номинальное значение магнитного потока двигателя.

Определим магнитный поток АД

$$\Phi = \frac{E_1}{C_1 f_{1H}} = \frac{I_0 \cdot x_0}{C_1 f_{1H}} = \frac{U_1 \cdot x_0 \cdot \sqrt{x_2'^2 + \left(\frac{r_2'}{s}\right)^2}}{AC_1 \cdot f_{1H}}, \quad (11)$$

где  $C_1 = 4,44 W_1 k_1$  - конструктивная постоянная статора машины;  $W_1$  - число последовательных витков одной фазы;  $k_1$  - обмоточный коэффициент;  $f_{1H}$  - номинальная частота питающего напряжения.

Совместное решение уравнений (7), (8), (10), (11) дает

$$\Delta P_c = s M \left( K_3 + \frac{K_4}{s^2} \right), \quad (12)$$

$$\text{где } K_3 = \frac{\Delta P_{CH} \cdot x_2'^2 \cdot \omega_{OH}}{\Phi_H^2 \cdot C_1^2 \cdot f_{1H}^2 \cdot m_1 \cdot r_2'}; \quad K_4 = \frac{\Delta P_{CH} \cdot r_2' \cdot \omega_{OH}}{\Phi_H^2 \cdot C_1^2 \cdot f_{1H}^2 \cdot m_1}.$$

В соответствии с (2) сумму составляющих потерь приравняем номинальным. Получим

$$\Delta P_H - \Delta P_{MX} = s M \left( K_5 + \frac{K_6}{s^2} \right), \quad (13)$$

где  $K_5 = K_1 + K_3 + \omega_{OH}$ ;  $K_6 = K_2 + K_4$ .

Из (13) определим зависимость  $M = f(s)$ , при выполнении которой потери мощности в АД будут равны номинальным

$$M = \frac{\Delta P_H - \Delta P_{MX}}{s \left( K_5 + \frac{K_6}{s^2} \right)}. \quad (14)$$

Решив (14) относительно  $s$ , получим

$$s = \frac{\Delta P_{1H} + \sqrt{\Delta P_{1H}^2 - K_7 M^2}}{K_8 M}, \quad (15)$$

где  $K_7 = 4K_5 \cdot K_6$ ;  $K_8 = 2K_5$ ;  $\Delta P_{1H} = \Delta P_H - \Delta P_{MX}$ .

Второй корень уравнения (14) в реальных условиях не имеет физического смысла.

Для определения закона изменения напряжения АД воспользуемся уравнением механической характеристики, из которого

$$\begin{aligned} U_1^2 &= \frac{M \cdot \omega_{OH} \cdot s \cdot \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}{m_1 \cdot r_2'} = \\ &= M s \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + K_9 \right] \cdot K_{10}, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $K_9 = (x_1 + x_2')^2$ ;  $K_{10} = \frac{\omega_{0H}}{m_1 \cdot r_2'}$ .

Решив совместно (15) и (16), получим

$$U_1 = \sqrt{(K_{12} + K_{11} \sqrt{\Delta P_{1H}^2 - K_7 M^2}) \left[ (r_1 + \frac{K_{13} \cdot M}{\Delta P_{1H} + \sqrt{\Delta P_{1H}^2 - K_7 M^2}})^2 + K_9 \right]}, \quad (17)$$

где  $K_{11} = \frac{K_{10}}{K_8}$ ;  $K_{12} = K_{11} \cdot \Delta P_{1H}$ ;  $K_{13} = K_8 \cdot r_2'$ .

Выражение (17) представляет собой закон изменения напряжения статора АД в функции электромагнитного момента при постоянстве потерь в машине. При определенном значении момента нагрузки в установившемся режиме АД будет работать в точке механической характеристики, вид которой определяется напряжением  $U_1$  согласно (17), со скольжением  $s$ , при котором потери в АД равны номинальным (рис. 1). Такой режим работы АД привода шлифовального круга благоприятен для прецизионных шлифовальных станков, которые устанавливаются в термоконстантных цехах. С уменьшением нагрузки и магнитного потока увеличивается скольжение  $s$  и при некотором значении момента нагрузки  $M_{СК}$  скольжение станет равно критическому.

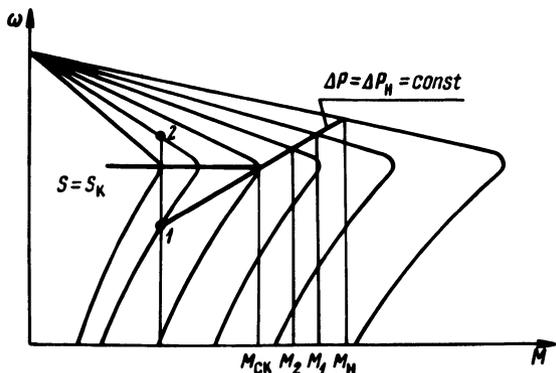


Рис. 1. Механические характеристики АД при регулировании напряжения по соотношениям (17), (18).

При  $s > s_k$  потери в АД будут номинальными лишь при работе его на неустойчивой части механической характеристики в точке 1 (рис. 1), что возможно только в замкнутой по скорости системе электропривода. В разомкнутой системе АД будет работать на устойчивой части механической характеристики в точке

2 (рис. 1) и потери мощности в АД будут ниже номинальных. Таким образом, регулирование напряжения необходимо осуществлять следующим образом: при  $M_{СК} \leq M \leq M_H$  по соотношению (17), а при  $M < M_{СК}$  так, чтобы выполнялось условие  $s = s_K = \text{const}$ , т. е. осуществлять регулирование с постоянством скольжения. Подставив в (17) значение  $s = s_K$ , получим

$$U_1 = \sqrt{M s_K \cdot \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + K_9 \right] \cdot K_{10}}. \quad (18)$$

Регулирование напряжения по (18) позволяет уменьшить магнитный поток до минимального уровня, определяемого критической величиной скольжения. На рис. 2 представлены зависимости  $U_1 = f(M)$  и  $s = f(M)$  при регулировании напряжения

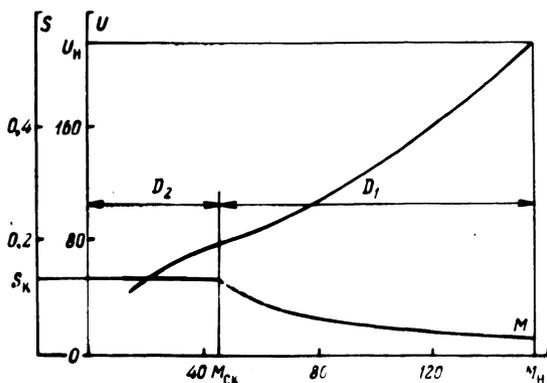


Рис. 2. Зависимости  $U_1 = f(M)$ ,  $s = f(M)$  при регулировании напряжения по соотношениям (17), (18);  $D_1, D_2$  — регулирование напряжения по соотношению (17) и (18) соответственно.

по соотношениям (17), (18). Регулирование напряжения АД привода шлифовального круга в зависимости от момента нагрузки по соотношениям (17), (18) позволит уменьшить вибрации, сохранить постоянным тепловой режим шлифовального станка, повысить производительность шлифования.

#### Литература

1. Кудинов В.А. Динамика станков. — М.: Машиностроение, 1979. — 367 с.
2. Геллер Б., Гаммата В. Дополнительные поля, моменты и потери мощности в асинхронных машинах. — М.-Л.; Энергия, 1964. — 317 с.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. — Л.: Энергия, 1974. — 642 с.

Г.И.Балуева, канд. техн. наук, В.П.Беляев, канд. техн. наук,  
О.П.Ильин, канд. техн. наук, В.Б.Игнатович, инженер (БПИ)

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИМПОРТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Первостепенной задачей современности является повышение производительности труда. Однако она не повышается сама по себе, а зависит от технической вооруженности работающего (фондовооруженности) и его знаний (науковооруженности), причем определяющим является последний фактор. По расчетам советских ученых [1] уже на рубеже 70-х годов каждый рубль, направленный в сферу науки, через несколько лет увеличивал национальный доход от 0,4 до 4 руб. Аналогичный эффект от роста фондовооруженности меньше в 3,5 раза.

Большое влияние на повышение эффективности производства оказывает интенсификация использования новой техники, которая из-за научно-технического прогресса морально устаревает через 5-7 лет. А в новых отраслях промышленности, таких как электроника, производство интегральных схем, каждые 6-7 лет происходит полная смена технологии. В этих условиях повышение эффективности производства путем интенсификации эксплуатации новой техники невозможно без постоянного повышения квалификации эксплуатационного персонала.

Особенно проявляется эта проблема при эксплуатации импортного электрооборудования. Примером может служить ПО "Химволокно" (г. Могилев), где с 1979 г. на 12-ти прядильных машинах находятся в эксплуатации частотноуправляемые электроприводы со статическими преобразователями частоты (СПЧ) типа Z1UF 19/380 и ZDE-40 производства западно-германских фирм, выполненных на основе современной силовой полупроводниковой техники с широким использованием микроэлектроники. Обслуживание такого электрооборудования требует высокой квалификации энергоперсонала, т. е. в его состав должны входить инженеры-наладчики силовой полупроводниковой техники. Однако типовым штатным расписанием этих специалистов, как правило, не предусмотрено. Таким образом, устранение отказов в работе электроприводов осуществляется инженерно-техническим персоналом службы энергетика производства. Средняя

длительность простоя прядильной машины зависит от субъективных и объективных факторов и составляет 6,5 ч. Каждый час простоя одной машины характеризуется недовыпуском более 600 кг продукта. В процессе устранения отказа основная часть времени (до 80%) уходит на поиск причины и места отказа. Необходимость повышения квалификации эксплуатационного энергоперсонала в данной ситуации вполне очевидна. Ее выполнение можно реализовать только при наличии соответствующей технической документации на русском языке. Перевод поставляемой с оборудованием технической документации, выполненный торговой палатой и даже инженерами в данной области, не может в полной мере выполнить поставленную задачу. Необходима специализированная научная обработка содержания документации с конкретизацией характерных моментов работы электрооборудования и подготовкой вспомогательного материала, обязательного для понимания основного. Экономический эффект от проведения работы по подготовке технической документации состоит в сокращении времени устранения отказов, времени на подготовку производства, а также на обучение персонала и т. д. Величина экономического эффекта от сокращения времени устранения отказа может быть определена следующим образом.

В соответствии с [2] критерием эффективности новых технологических процессов и способов организации производства является годовой экономический эффект

$$\Delta = (Z_1 - Z_2) \Pi, \quad (1)$$

где  $Z_1, Z_2$  - удельные приведенные затраты базового и нового варианта соответственно, руб./ед. прод.;  $\Pi$  - годовой объем производства, ед. прод.

Удельные приведенные затраты

$$Z = C + E_N K, \quad (2)$$

где  $C$  - себестоимость единицы продукции, руб.;  $E_N K$  - нормативная прибыль;  $K$  - удельные капитальные вложения в расчете на единицу продукции, руб.;  $E_N = 0,15$  - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

Себестоимость продукции складывается из стоимости сырья и материалов, топлива и энергии, зарплаты основных производственных рабочих с отчислениями на социальное страхование, расходов на содержание и эксплуатацию оборудования, цеховых и общезаводских расходов, потерь от брака, внепроизводственных расходов. Часть статей калькуляции изменяется пропорционально количеству выпущенной продукции, другая часть остается

неизменной (условно-постоянной), потери от брака зависят от количества наработанного брака продукции. Он возникает при отказах СПЧ в связи с непрерывностью технологического процесса. При останове прядильной машины расплавленная химическая масса продолжает поступать в нее из подающего насоса и идет в брак. Так продолжается некоторое время, в течение которого электрики убеждаются, что быстро устранить неисправность они не могут. После этого машина отключается от химического процесса и останавливается. Волокно снова идет в отходы после запуска машины и наладки технологического процесса. Себестоимость бракованной продукции за год составляет

$$C_{\text{бр}} = C_{\text{П ч}} (t_{\text{бр}} + t_{\text{тех}}) N, \quad (3)$$

где  $C$  - себестоимость волокна, руб./т;  $\text{П ч}$  - часовая производительность прядильной машины, т;  $t_{\text{бр}} + t_{\text{тех}}$  - время работы машины до отключения от химического процесса и время наладки технологического процесса после запуска машины, ч;  $N$  - количество отказов машины в год.

Для упрощения расчетов принимаем поток отказов машин простейшим, подчиняющимся закону ординарности и отсутствия последствия.

За все время возникновения отказа до полной наладки технологического процесса продукция не выпускается. Количество ее может быть определено по формуле

$$\text{П}_{\text{нед}} = \text{П}_{\text{час}} (t_{\text{нед}}^{\text{р}} \cdot n_{\text{раб}} + t_{\text{нед}}^{\text{н.р}} \cdot n_{\text{н.р}}),$$

где  $t_{\text{нед}}^{\text{р}}$ ,  $t_{\text{нед}}^{\text{н.р}}$  - длительность недоотпуска продукции при возникновении отказа в рабочее для ИТР время и в нерабочее соответственно

$$t_{\text{нед}}^{\text{р}} = t_{\text{отк}}^{\text{р}} + t_{\text{тех}}; \quad (4)$$

$$t_{\text{нед}}^{\text{н.р}} = t_{\text{отк}}^{\text{н.р}} + t_{\text{тех}}, \quad (5)$$

где  $t_{\text{отк}}^{\text{р}}$ ,  $t_{\text{отк}}^{\text{н.р}}$  - длительность устранения отказа в рабочее и нерабочее для ИТР время.

Так как 80% времени ремонта составляет поиск неисправностей, то наличие методик и тестов их нахождения поможет сократить это время в 2-3 раза. Время самого ремонта также может сократиться при наличии специальной документации и повышении специального образования персонала. Сокращение числа отказов и длительности их устранения приведет к уменьшению брака и увеличению выпуска годной продукции.

Сокращение брака продукции

$$\Delta C_{\text{бр}} = C_{\text{б}} (t_{\text{бр}} + t_{\text{тех}}) \Delta N. \quad (6)$$

Дополнительный выпуск продукции

$$\Delta П = П_{\text{нед}} - П'_{\text{нед}}, \quad (7)$$

где  $\Delta N$  - сокращение числа отказов;  $П'_{\text{нед}}$  - снижение недоотпуска продукции.

Проведенные на примере ПО "Химволокно" расчеты показали, что стоимость наработанного за 1980 г. брака продукции от отказов СПЧ составила 44 тыс. руб., а ее недовыпуск - 150 т. Сокращение числа и длительности отказов позволит уменьшить брак продукции на 24 тыс. руб. и выпустить дополнительно 112 т волокна, в результате чего снизится его себестоимость.

Для определения экономического эффекта по формуле (1) необходимо знание удельных капитальных вложений по базовому варианту ( $K_{\text{б}}$ ) и после использования научных рекомендаций ( $K_{\text{н}}$ ). Рассчитать их можно по выражениям

$$K_{\text{б}} = \frac{K_{\text{о.ф}}}{П_1}; \quad K_{\text{н}} = \frac{K_{\text{о.ф}} + K_{\text{доп}}}{П_1 + \Delta П},$$

где  $K_{\text{о.ф}}$  - капиталовложения в основные фонды производства синтетического волокна;  $K_{\text{доп}}$  - дополнительные затраты производства на доработку документации научной организацией.

Народнохозяйственный экономический эффект от сокращения брака продукции в цехе производства синтетического волокна составляет 60-70 тыс. руб. в год. Дополнительный эффект использования специальной документации заключается в сокращении затрат времени на освоение новой техники, т. е. сокращение затрат времени на обучение энергоперсонала эксплуатационному обслуживанию и текущему ремонту СПЧ, на разработку эксплуатационной документации (паспорта оборудования, составление и корректировка схем электрооборудования и т. п.). Этот эффект характеризует предотвращенные непроизводительные потери времени ИТР и рабочих. Их размер можно оценить путем экспертных оценок в человеко-часах и определить условную экономию фонда зарплаты. Произведенные нами расчеты показали, что размер этой экономии в цехе ПСВ может составить 16-23 тыс. руб.

Таким образом, содружество производства с научными организациями, научная обработка технической документации на новое импортное электрооборудование дает существенный эконо-

мический эффект. Эффективность НИР составляет 2,0–2,5 руб. на 1 руб. дополнительных затрат.

### Л и т е р а т у р а

1. Несветайлов Г.А. Наука и ее эффективность. – Минск: Наука и техника, 1979. – 100 с. 2. Методика (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. – М.: Экономика, 1977. – 44 с.

УДК 621.372.501.14

В.М.Бладыко, канд. техн. наук, Л.И.Сончик, инженер (БПИ)

### АППРОКСИМАЦИЯ СЕМЕЙСТВА "СРЕДНИХ" КРИВЫХ НАМАГНИЧИВАНИЯ СЕРДЕЧНИКА

Аналитический расчет любой нелинейной электрической цепи, содержащей катушки с ферромагнитными сердечниками, всегда начинается с решения задачи аппроксимации. При этом перед исследователем возникает вопрос о том, какую кривую намагничивания аппроксимировать. Наиболее "доступной" является основная кривая намагничивания, которая приводится в справочниках и которую нетрудно снять экспериментальным путем. Однако аппроксимация основной кривой намагничивания может привести к принципиально ошибочным результатам, в особенности, если использовать аппроксимацию начального участка основной кривой намагничивания [1]. Поэтому некоторые авторы рекомендуют при аналитических расчетах аппроксимировать "среднюю" кривую намагничивания, а еще лучше – семейство "средних" кривых намагничивания [2, 3]. Однако экспериментальное определение "средних" кривых намагничивания связано с трудоемким процессом снятия петель гистерезиса.

В настоящей статье предлагается простой метод аппроксимации "средних" кривых намагничивания, не требующий предварительного определения петель гистерезиса. Метод основан на измерении с помощью схемы, изображенной на рис. 1,а, двух характеристик катушки с ферромагнитным сердечником: вольт-амперной характеристики по действующим значениям и вольт-амперной характеристики по амплитудным значениям (рис.1,б).

Выберем в качестве выражения, аппроксимирующего "среднюю" кривую намагничивания, гиперболический синус

$$h = \alpha \operatorname{sh} \beta, \quad (1)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  - коэффициенты аппроксимации.

При синусоидальном законе изменения магнитной индукции

$$b = B_m \sin \omega t$$

действующее значение напряженности поля можно определить из выражения [2]

$$H = \alpha \sqrt{\frac{1}{2} [I_0(2\beta B_m) - 1]}, \quad (2)$$

где  $I_0(2\beta B_m)$  - модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

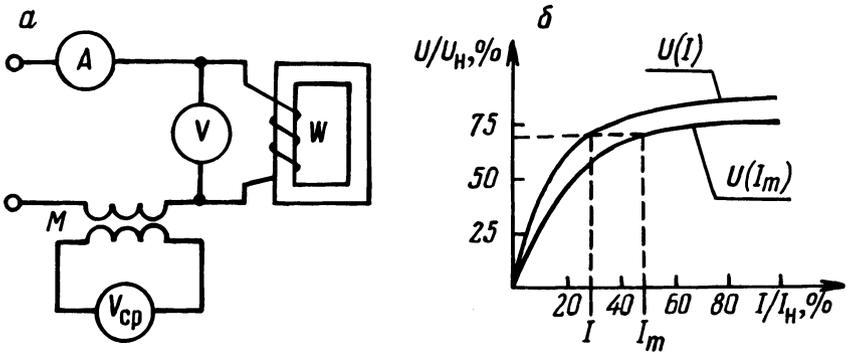


Рис. 1. Схема измерения (а) и вольтамперные (б) характеристики катушки с ферромагнитным сердечником.

Амплитуда напряженности магнитного поля связана с амплитудой магнитной индукции соотношением

$$H_m = \alpha \operatorname{sh} \beta B_m. \quad (3)$$

Решая систему уравнений (2) и (3), находим коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ .

Так, коэффициент  $\beta$  находится из выражения

$$\frac{H_m}{H} = \frac{\sqrt{2} \operatorname{sh} \beta B_m}{\sqrt{I_0(2\beta B_m) - 1}}. \quad (4)$$

С учетом найденного значения  $\beta$  коэффициент  $\alpha$  определяется из выражения (2)

$$\alpha = \frac{H_m}{\operatorname{sh} \beta B_m} \quad (5)$$

или из выражения (3)

$$\alpha = \frac{\sqrt{2} H}{\sqrt{I_0(2\beta B_m) - 1}}. \quad (6)$$

Амплитудные значения индукции и напряженности магнитного поля и действующее значение напряженности магнитного поля, необходимые для определения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , рассчитываются по показаниям измерительных приборов, включенных по схеме на рис. 1, а:

$$B_m = \frac{U}{4,44fwS}; \quad (7)$$

$$H = \frac{Il}{w}; \quad (8)$$

$$H_m = \frac{I_m l}{w}, \quad (9)$$

где  $I_m = \frac{U_{cp}}{4fM}$ . (10)

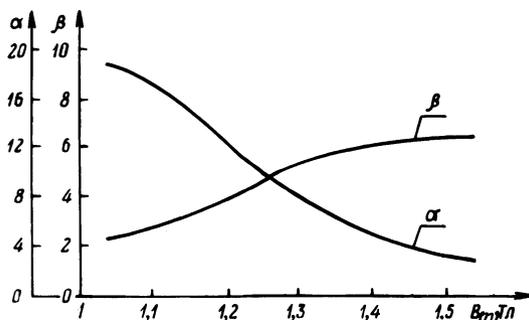


Рис. 2. Зависимость коэффициентов аппроксимации "средних" кривых намагничивания от магнитной индукции.

На рис. 2 приведены коэффициенты аппроксимации "средних" кривых намагничивания, рассчитанные для ферромагнитного сердечника из стали Э42. Как видно из рис. 2, коэффициенты аппроксимации зависят от амплитуды магнитной индукции.

#### Литература

1. Янус Р.И., Фридман Я.А. О случаях неправильного применения коммутационной кривой магнитности при приближенных расчетах цепей с ферромагнетиками. - Электричество, 1958, № 6, с. 77-80.
2. Савиновский Ю.А., Нерсесян В.С. Об аппроксимации процессов намагничивания ферромагнитных сер-

дечников с учетом гистерезиса. – Электричество, 1969, № 3, с. 69–73. З. Бладыко В.М., Мехедко В.Ф., Сончик Л.И. Гармонический синтез кривой намагничивания. –Изв. вузов СССР. Энергетика, 1975, № 10, с. 136–139.

УДК 621.319.7

П.М.Корниенко, канд. техн. наук,  
В.С.Лившиц, канд. техн. наук,  
В.Ф.Силюк, канд. техн. наук,  
В.М.Климович, инженер (БПИ)

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СБОРОЧНЫХ ЦЕХАХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Современное производство радиоэлектронной аппаратуры и приборов предъявляет повышенные требования к чистоте помещений и воздушной среды. Это обусловило широкое применение в таких цехах синтетических и полимерных материалов, которые обладают рядом положительных свойств: они прочны, устойчивы к истиранию, не отделяют частиц, ворса, с них легко удаляются пыль и загрязнения. Однако эти материалы, как правило, хорошо электризуются и имеют малую электропроводность, что способствует накоплению электростатических зарядов и росту напряжения относительно земли и заземленных предметов.

Возникновение и накопление электростатических зарядов может происходить на одежде и теле человека, диэлектрических покрытиях столов и пола, межоперационной таре, а также проводящих, но изолированных от земли предметах: пинцетах, паяльниках, приспособлениях, корпусах изделий.

Характерны следующие виды повреждений: частичный или полный пробой р–п–переходов, расплавление и сгорание металлизированных дорожек, пробой диэлектрика, частичное расплавление металлизации МОП–транзисторов, разрыв электродов вследствие теплового и электродинамического воздействия [1]. Степень повреждения – ухудшение характеристик изделия или полный отказ – зависит от напряжения и энергии разряда.

При электростатическом разряде с напряжением, близким к критическому (минимально опасному), возможно изменение вольт–амперных характеристик изделия, изменение коэффициентов передачи, увеличение обратных токов. При разряде с напряжением, большим критического, резко возрастает вероятность полного отказа изделия. Критические значения статического напряже-

ния для разных групп полупроводниковых изделий приведены в табл. 1 (по данным [1] ).

Нами выполнено опытное обследование электростатических напряжений в сборочных цехах завода, выпускающего электронные приборы. Для измерений использовался специально изготовленный для этой цели электрометр с бесконтактным датчиком конденсаторного типа, имеющий диапазон измерений 10–20 000 В. Напряжение измерялось на людях (монтажниках), рабочих столах, стульях, монтажных платах, таре и других объектах (табл. 2). На протяжении трех месяцев на каждом объекте было выполнено от 4 до 6 измерений.

Монтажные столы в обследованных цехах покрыты листовым пластиком и оборудованы стальным листом для инструмента, заземленным через сопротивление 1 МОм. Монтажники работают, как правило, с надетым на руку заземляющим браслетом. Несмотря на эти меры, направленные на предотвращение образования статического электричества, в ряде случаев как на столах, так и на монтажных столах было обнаружено электростатическое напряжение. Как выяснилось, это было следствием нарушения заземляющей цепи.

В то же время отмечены случаи, когда работа без заземляющего браслета не приводила к накоплению электростатического

Таблица 1.

Минимальные опасные значения  
электростатического напряжения

Группы полупроводниковых изделий	Опасное напряжение, В
Германиевые маломощные ВЧ и СВЧ транзисторы	200
Кремниевые маломощные ВЧ и СВЧ транзисторы	400
ВЧ и СВЧ транзисторы средней мощности	2000
Мощные ВЧ и СВЧ транзисторы	7000
Низкочастотные транзисторы	1000
Полевые транзисторы с изолированным затвором	30
Полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом	600
Интегральные микросхемы	30

Таблица 2.

Наибольшие значения электростатического напряжения,  
полученные при обследовании

Обследованный объект	Наибольшее замеренное напряжение, В
Монтажницы (на ладни)	
с заземляющим браслетом на руке	130
без заземляющего браслета	220
Монтажные столы	
на пластиковом покрытии	290
на стальном листе для инструмента	250
Стулья монтажниц	
с дерматиновым сидением	440
с матерчатым сидением	120
Стол для комплектования деталей и полупроводниковых изделий	
на пластиковом покрытии	440
Пластмассовая ванна (тара) для переноски полупроводниковых изделий и микросхем	
на внешней поверхности	180
на внутренней поверхности	700
Коробка пластмассовая с упакованными микросхемами	
на крышке коробки	160
на поролоновой прокладке между крышкой и микросхемами	400
на корпусах микросхем	840

заряда на монтажной. Это объясняется тем, что и при отсутствии заземляющего браслета имеются возможности для стока заряда с монтажных, например, при касании заземленного стального листа на столе или других заземленных предметов. Однако вероятность (частота) появления электростатического напряжения на монтажных и его наибольшее значение при работе без заземляющего браслета, несомненно, повышается.

Многообразные и порой неожиданные причины электризации показывает следующий случай. Проходя мимо монтажной с датчиком в руке, наш сотрудник заметил резкое отклонение указателя электрометра. Измерение напряжения на монтажной дало высокий, ранее никогда не наблюдавшийся результат — 600 В.

Выяснение причин появления значительного напряжения привело к выводу, что виной была прическа девушки: распушенные по плечам волосы вызвали значительную электризацию трением. Когда волосы были убраны под косынку, электризация прекратилась.

Неожиданностью оказалось также недопустимо высокое электростатическое напряжение (до 840 В), обнаруженное на поверхности микросхем, хранящихся в упаковке заводов-изготовителей (картонных и пластмассовых коробках). Наиболее высокие напряжения (вследствие хороших условий для электризации трением) были в тех коробках, где между крышкой и микросхемой уложена поролоновая прокладка.

Сопоставление данных табл. 1 и 2 показывает, что в сборочных цехах электронных приборов статическое электричество представляет реальную опасность для ряда полупроводниковых изделий. К таким изделиям, в частности, относятся полевые транзисторы с изолированным затвором, интегральные микросхемы, маломощные ВЧ и СВЧ транзисторы. Положение усугубляется тем, что образование электростатических зарядов возможно на всех стадиях производственного процесса: во время хранения, комплектования и подачи полупроводниковых изделий на монтажные столы, при монтаже и сборке приборов, их наладке и испытании. Поэтому в цехах, подобных обследованному, выявление мест и причин статической электризации, организация оперативного контроля и принятие эффективных мер по устранению статического электричества представляют актуальную проблему. Решение этой проблемы на предприятиях радиоэлектронной промышленности будет способствовать снижению брака продукции, повышению ее надежности и качества.

#### Л и т е р а т у р а

1. Куверзнев В.А., Зайцев А.А., Овечкин Ю.А. Статическое электричество в полупроводниковой промышленности. - М.: Энергия, 1975. - 180 с.

УДК 621.316.13

Л.И.Демиденко, инженер (БПИ)

#### ИСПЫТАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СЧЕТЧИКА ПОТЕРЬ

Счетчики потерь учитывают потери электроэнергии в сетях высокого напряжения, а также в силовых трансформаторах и автотрансформаторах. Они изготавливаются на базе трехфазных

счетчиков активной энергии типа И-43. Для создания вращающего момента используется только один измерительный элемент счетчика, состоящий из токовых обмоток и катушки напряжения.

Обмотка цепи тока  $W_1$  (рис. 1) имеет 90 витков, намотанная проводом марки ПЭВ-2 диаметром 0,8 мм. На каркасе катушки напряжения накладываются две обмотки  $W_2 = 275$  и  $W_3 = 150$  витков, намотанные проводом марки ПЭВ-2 диаметром 0,8 мм, включаемые между собой последовательно (рис. 1).

Катушки  $W_1$ ,  $W_2$  и  $W_3$  соединяются внутри счетчика по схеме рис. 2.

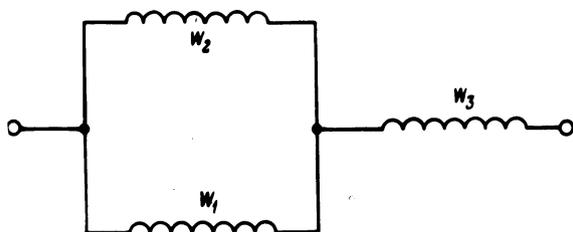


Рис. 1. Схема соединения обмотки цепи тока.

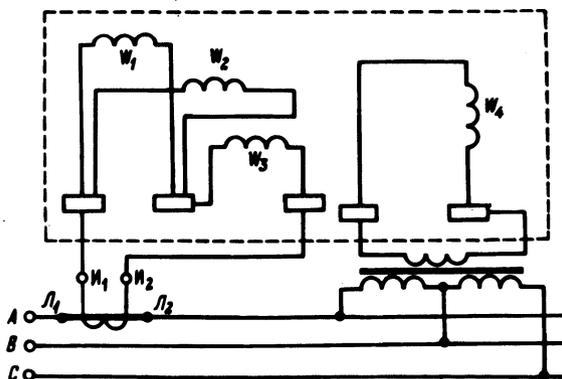


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема счетчика потерь.

Для увеличения точности работы счетчика потерь энергии при малых нагрузках порядка (0,1–0,2) А создается момент компенсации трения при помощи параллельной обмотки  $W_4$  (рис. 2) с номинальным напряжением 100 В второго измерительного элемента. При этом постоянный магнит со второго измеритель-

ного элемента изымается. Отсчет показаний счетчика осуществляется по счетному механизму, связанному жесткой кинематической связью с подвижной частью счетчика. Для счетчика потеря берется счетный механизм таким образом, чтобы передаточное число до запятой было соответственно равно:

$$1 \text{ A}^2 \text{ ч} = 2000 \text{ об. диска};$$

$$1 \text{ A}^2 \text{ ч} = 2500 \text{ об. диска.}$$

Для обычных счетчиков энергии основное уравнение имеет вид

$$PT = CN,$$

где  $P$  - мощность нагрузки;  $T$  - время нахождения счетчика под нагрузкой;  $C$  - постоянная счетчика;  $N$  - передаточное число счетного механизма.

По аналогии со счетчиками энергии основное уравнение счетчика потерь будет

$$I^2 T = CN. \quad (1)$$

Для принятых нами передаточных чисел ( $N_1 = 2000$  и  $N_2 = 2500$ ) их номинальные постоянные в амперквадрат-секундах на оборот диска подсчитываются по формулам:

$$C_{1\text{ном}} = \frac{I^2 t}{N_1} = \frac{3600 I^2}{2000} = 1,8 \frac{\text{A}^2 \cdot \text{с}}{\text{об. диска}};$$

$$C_{2\text{ном}} = \frac{I^2 t}{N_2} = \frac{3600 I^2}{2500} = 1,44 \frac{\text{A}^2 \cdot \text{с}}{\text{об. диска}}.$$

Для подсчета потерь электроэнергии по счетчику потерь следует пользоваться следующим выражением:

$$\Delta W = (A_2 - A_1) 3R \cdot k_{\text{ТТ}}^2 \cdot 10^{-3} \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где  $A_2 - A_1$  - разность показаний счетчиков потерь за отчетный период;  $3R$  - активное сопротивление трехпроводной линии электропередачи, Ом;  $k_{\text{ТТ}}$  - коэффициент трансформации измерительного трансформатора тока.

Проверка счетчиков потерь осуществляется на стенде для регулировки трехфазных или однофазных счетчиков. Скорость вращения диска при изменении тока от 0,1 до 1 А увеличивается при этом в 100 раз вследствие квадратичной зависимости вращающего момента счетчика от тока нагрузки.

Для уменьшения рассеяния магнитного потока магнитопровод катушки  $W_1$  крепится латунными винтами через алюминиевые прокладки или шайбы. Магнитопроводы катушек  $W_1$ ,  $W_2$  и  $W_3$  должны находиться от диска счетчика на расстоянии 2-3 мм.

Регулировка тормозящего действия постоянного магнита счетчика производится при нагрузке 1 А, после чего поверяется на самоход. Самоход устраняется обычными методами. Регулирующее устройство компенсации трения устанавливается нейтрально по диаметру диска.

После устранения самохода производят поверку при нагрузке 0,1 А, при этом может оказаться, что отсчитываемое время будет больше нормального. В этом случае следует уменьшить воздушный зазор между магнитопроводами токовых катушек. После этой регулировки счетчик снова поверяется при нагрузке 0,1 А и на отсутствие самохода. Для контроля величины напряжения при поверке счетчика на самоход необходимо пользоваться вольтметром класса точности 0,5 или 1,0. Напряжение 100 В подается на катушку  $W_4$  (рис. 2) при регулировке на всех нагрузках.

Таким образом, все операции по изготовлению и регулировке счетчика потерь можно разделить на следующие этапы: 1) намотка катушки, сборка счетчика; 2) подготовка к регулировке; 3) регулировка тормозящего действия постоянного магнита при нагрузке 100% от потерь энергии при номинальном токе 1 А; 4) устранение самохода и испытание чувствительности.

Номинальное время определяется из основного уравнения счетчика потерь (1)

$$T_n = \frac{C_{1\text{ном}} \cdot n}{12}.$$

Так как

$$C_{1\text{ном}} = \frac{3600 I^2}{N},$$

то

$$T_n = \frac{3600 \cdot n}{12 N}, \quad (2)$$

где  $n$  — количество оборотов диска при регулировке счетчика.

На основании (2) приводится табл. 1 нормального времени для регулировки счетчика потерь.

Счетчик потерь регулируется при нагрузке (1–0,4) А положением постоянного магнита и зазором между магнитопроводами токовых катушек. Регулировка при нагрузке (0,2–0,1) А осуществляется устройством для компенсации трения.

После контрольной поверки на всех нагрузках может оказаться, что при нагрузке 0,4 А скорость диска счетчика потерь получится большей, чем во время первоначальной регули-

Таблица 1.

Таблица нормального времени для регулировки  
счетчика потерь

Потери в % от номинальной	Нагрузка А	N <sub>1</sub> = 2000		N <sub>2</sub> 2500	
		n, об.	T <sub>1НОМ</sub>	n, об.	T <sub>2НОМ</sub>
100	1	40	72	40	57,6
64	0,8	20	56,4	24	54
36	0,6	10	50	15	60
16	0,4	6	67,5	6	54
4	0,2	1	45	2	72
1	1	1	180	1	144

ровки при этом же токе. Это объясняется тем, что регулируя скорость вращения диска при нагрузках 0,1 – 0,2 А устройством для компенсации трения, несколько увеличиваем скорость вращения диска при нагрузке 0,4 А. Подрегулировка при нагрузке 0,4 А осуществляется устройством для регулировки обычных счетчиков при 10%-ной нагрузке. Погрешность счетчика потерь при всех нагрузках составляет  $\pm 2,5\%$ .

#### Л и т е р а т у р а

1. Илюкович А.М. Электрические счетчики. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 2. Горюнов П.Н., Пигин С.М., Шумиловский Н.Н. Электрические счетчики. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1951.

УДК 621.313.3

А.И. Лapidус, канд. техн. наук (БПИ)

#### СХЕМА ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ДАТЧИКОМ КОНТРОЛЯ СКОРОСТИ

Принцип индукционно-динамического торможения асинхронных двигателей может быть реализован различными схемными решениями [1, 2]. Однако большинство известных схем этого способа торможения обладает следующими недостатками.

1. Во время торможения из сети потребляется значительная составляющая постоянного тока, что отрицательно сказывается на работе всей сети.

2. Обычно в таких схемах контроль длительности торможения осуществляется в функции времени. Разброс выдержки времени у реле времени неизбежен, кроме того, из-за возможных колебаний напряжения сети, изменения момента сопротивления на валу двигателя и т. д., выдержка времени выбирается с некоторым запасом. Все это приводит к тому, что заторможенный двигатель некоторое время еще остается под током, что обуславливает его дополнительный нагрев и дополнительное потребление энергии из сети.

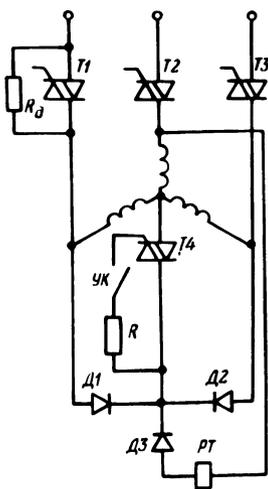


Рис. 1. Схема торможения.

Указанных недостатков лишена разработанная схема, которая представлена на рис.1. Здесь из сети потребляется только переменный ток, и контроль длительности торможения осуществляется в функции скорости. Схема работает следующим образом: С подачей команды на торможение отключаются симисторы T1 и T2, после чего включается ключ УК. В любой полупериод напряжения питающей сети через резистор  $R_d$ , симистор T3 через вентиль D1 или D2, резистор R и ключ УК включается симистор T4, образуя замкнутый контур из токового реле РТ, вентиля D3 и фазной обмотки статора, подсоединенной к отключенному симистору T2. Половину периода питающего напряжения ток из сети идет через резистор  $R_d$ , вентиль D1,

симистор T4, фазную обмотку статора и симистор T3. Вторую половину периода питающего напряжения ток из сети идет через симистор T3, вентиль D2, симистор T4, вторую фазную обмотку статора и резистор  $R_d$ .

Таким образом, каждая из двух обмоток статора, подключенных к сети, периодически шунтируется вентилем. В ту часть периода, когда происходит шунтирование обмотки, через нее продолжает идти ток прежнего направления, обусловленный не только индуктивностью статора, но и электродвижущей силой, наведенной магнитным полем ротора. Следовательно, тормозной эффект достигается здесь в результате действия двух факторов:

короткого замыкания обмоток статора через вентиль и динамического торможения. Добавочное сопротивление  $R_d$  ограничивает ток и момент при торможении.

Анализ осциллограмм показал, что ток в фазе двигателя в процессе торможения изменяется незначительно, поэтому с целью упрощения расчет токов целесообразно проводить для заторможенного двигателя.

При определении тока фазы двигателя  $i_\phi$  для проводящей части периода может быть составлено дифференциальное уравнение

$$\frac{X_k}{\omega} \cdot \frac{di_\phi}{dt} + (R_k + R_d) \cdot i_\phi = \sqrt{2} U \sin \omega t, \quad (1)$$

где  $X_k = X_1 + X_2'$  и  $R_k = R_1 + R_2'$  - соответственно индуктивное и активное сопротивление фазы двигателя в режиме короткого замыкания;  $X_1$  и  $X_2'$  - индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора и индуктивное приведенное сопротивление фазы ротора;  $R_1$  и  $R_2'$  - активное сопротивление фазы статора и приведенное сопротивление фазы ротора;  $U$  - действующее значение линейного напряжения.

Для непроводящей части периода, когда происходит шунтирование вентилем обмотки статора, справедливо уравнение

$$\frac{X_k}{\omega} \cdot \frac{di_\phi}{dt} + R_k \cdot i_\phi = 0. \quad (2)$$

Решение уравнения (1) имеет вид

$$i_\phi = \frac{\sqrt{2} U}{\sqrt{(R_d + R_k)^2 + X_k^2}} \left[ \sin(\omega t - \varphi) + C_1 \cdot e^{-\frac{R_d + R_k}{X_k} \omega t} \right] \quad (3)$$

где  $C_1$  - постоянная интегрирования свободной составляющей тока;

$$\varphi = \arctg \frac{X_k}{R_d + R_k}.$$

Решение уравнения (2) может быть записано в виде

$$i_\phi = C_2 e^{-\frac{R_k}{X_k}(\omega t - \theta)}, \quad (4)$$

где  $C_2$  - постоянная интегрирования;  $\theta$  - расчетный угол, который соответствует моменту начала протекания тока в контуре, состоящем из фазной обмотки и вентиля.

Зависимость  $\theta = f\left(\frac{X_k}{R_d + R_k}\right)$  вычисляется в соответствии с

рекомендациями, приведенными в [3]. Постоянные интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  находятся путем совместного решения уравнений (3) и (4), исходя из условия, что ток в обмотке скачком измениться не может. И в моменты времени, соответствующие углам  $0$  и  $\theta$ , ток в фазе одновременно описывается как уравнением (3), так и (4).

Постоянную составляющую фазного тока, которая обуславливает динамическое торможение двигателя, можно представить в виде

$$I_{\phi-} = I'_{\phi-} + I''_{\phi-} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\theta} i_{\phi} d\omega t + \frac{1}{2\pi} \int_{\theta}^{2\pi} i_{\phi} d\omega t, \quad (5)$$

где  $I'_{\phi-}$  - составляющая тока фазы двигателя, протекающая в проводящую часть периода, определяется из уравнения (3);  $I''_{\phi-}$  - составляющая тока фазы двигателя, протекающая в непроводящую часть периода, определяется из уравнения (4).

Магнитное поле вращающегося ротора наводит эдс вращения в короткозамкнутом контуре, образованном третьей фазной обмоткой статора и токовым реле РТ. Ток в этом контуре создает дополнительную составляющую тормозного момента, величина которого особенно велика в области высоких скоростей. Пик этого момента качественно можно оценить по приближенной формуле [4]

$$M_m = -2M_k V_o^2 \frac{\omega}{(1 - \sigma)(\alpha_r^2 + \omega^2)} \cdot (\alpha_r - \omega e^{-\frac{\pi\alpha_r}{2\omega_o}}), \quad (6)$$

где  $M_k$  - критический момент двигателя по статической характеристике;  $V_o$  - коэффициент, характеризующий степень уменьшения наведенной эдс в статорной обмотке затухающим магнитным потоком;  $\sigma$  - коэффициент рассеяния по Блонделю;  $\alpha_r$  - коэффициент затухания роторной обмотки при замкнутой статорной;  $\omega_o$ ,  $\omega$  - соответственно синхронное и текущее значение угловой скорости ротора.

Одним из существенных достоинств рассматриваемой схемы торможения является возможность использования короткозамкнутого контура с токовым реле РТ в качестве датчика контроля скорости. Токовое реле настраивается так, что при остановке двигателя оно дает сигнал на отключение всей схемы от сети. Тем самым обеспечивается высокая степень точности останова и исключается дополнительный нагрев двигателя, который имел бы место при контроле длительности торможения, например в функции времени.

На рис. 2 приведена осциллограмма изменения частоты вращения  $n$ , тока фазы  $i_\phi$ , подключенной к сети, и тока в короткозамкнутом контуре  $i_k$  двигателя АОЛ2-21-4 ( $P_H = 1,1$  кВт), снятая при добавочном сопротивлении в цепи статора  $R_d = 12$  Ом. Из осциллограммы видно, что время торможения составило 0,09 с.

Для оценки времени торможения целесообразно действительный процесс торможения заменить эквивалентным, при котором снижение скорости до полной остановки производится как бы в два этапа. На первом этапе, в зоне высоких скоростей, действует момент короткого замыкания, а на втором этапе, в зоне средних и низких скоростей, действует момент динамического торможения. Усредненное значение продолжительности первого этапа торможения может быть получено по эмпирической формуле [5]

$$t_1 = 0,45 \frac{GD_p^2}{GD_{\text{прив}}^2} \cdot \sqrt{\frac{GD_p^2 \cdot n}{375(K_{\text{п}} + K_{\text{м}})M_H}}, \quad (7)$$

где  $GD_p^2$ ,  $GD_{\text{прив}}^2$  - маховой момент соответственно ротора двигателя и привода;  $n$  - номинальная частота вращения;  $M_H$  - номинальный момент;  $K_{\text{п}}$ ,  $K_{\text{м}}$  - соответственно кратность пускового и максимального моментов по отношению к номинальному.

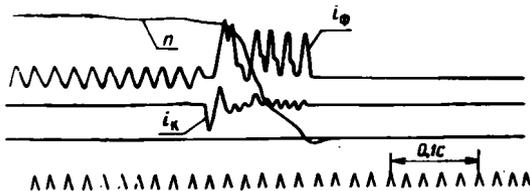


Рис. 2. Осциллограмма процесса торможения двигателя типа АОЛ2-21-4.

Продолжительность второго этапа торможения вычисляется по обычной для динамического торможения методике и может быть найдена как

$$t_2 = \frac{T_d \cdot s_{2m}}{2} \left( \frac{s_1^2 - s_2^2}{2s_{2m}^2} + \ln \frac{s_1}{s_2} \right), \quad (8)$$

где  $T_d$  - постоянная времени привода;  $s_{2m}$  - критическое скольжение;  $s_1$  - скольжение, с которого начинается второй этап торможения;  $s_2$  - можно принять равным 0,03.

Общее время торможения равно

$$t_{\tau} = t_1 + t_2. \quad (9)$$

### Литература

1. Лapidус А.И. Индукционно-динамическое торможение асинхронных двигателей в станочных электроприводах. - В сб.: Электротехническая промышленность. Сер. "Электропривод", 1975, вып. 4, с. 26-28.
2. Лapidус А.И. Тиристорная схема торможения асинхронного двигателя. - В сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики, 1979, вып. 6, с. 98-101.
3. Розенблат М.А. Магнитные усилители. - М., 1960, с. 538.
4. Соколов М.М. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе. - М., 1967, с. 201.
5. Каплан Н.А., Лapidус А.И. Безвибрационное торможение асинхронных двигателей по несимметричным схемам с вентилями, - Электротехника, 1972, № 11, с. 19-23.

УДК 621.314.53

В.Л.Анхимюк, докт. техн. наук,  
В.А.Новицкая, канд. техн. наук,  
Е.П.Раткевич, инженер (БПИ)

### ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИРИСТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В РЕЖИМЕ ПРЕРЫВИСТЫХ ТОКОВ

Одной из задач проектирования систем тиристорных электроприводов является прогнозирование динамических свойств заданной структуры объекта управления при различных режимах работы и значениях ее параметров.

В литературе недостаточно освещен вопрос динамических характеристик электроприводов в режиме прерывистых токов.

Наиболее полное решение поставленной задачи возможно при использовании в процессе исследования переходных режимов мгновенных значений фазовых координат объекта управления (ОУ), под которым будем понимать электродвигатель совместно с преобразователем. Динамическая модель ОУ представлена на рис. 1, где ФУ - фазосдвигающее устройство тиристорного преобразователя ТП; ДИС - ключ, имитирующий дискретность ТП, замыкающийся в контактные моменты времени и находящийся в разомкнутом состоянии в течение всего интервала дискретности,

КОМ – ключ, имитирующий коммутацию тока с тиристора на тиристор; Тр – согласующий трансформатор; РПТ – диод, имитирующий режим прерывистого тока; Т и  $T_M$  – электромагнитная и электромеханические постоянные времени привода;  $U_y$  – напряжение управления;  $\vartheta_0$  – угол открывания вентилей преобразователя;  $F(p)$  – операторное изображение функции управления, представляющей собой последовательность импульсов выходного напряжения преобразователя,  $I_c R_0$  – возмущающее воздействие.

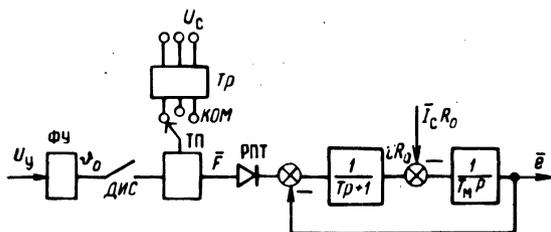


Рис. 1. Динамическая модель объекта управления.

Математическая модель ОУ относительно задающего воздействия при общепринятых допущениях

$$\epsilon + i + T \frac{di}{dt} = F(p); \quad (1)$$

$$i - T_M \frac{d\epsilon}{dt} = i_c, \quad (2)$$

где  $\epsilon$ ,  $i$ ,  $i_c$  – относительные мгновенные значения скорости, тока главной цепи и статического тока соответственно [1].

Функция управления при любом законе изменения угла открывания может быть записана в виде

$$F(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^r f_{js}(t) (1(\alpha_{j,s-1}(t)) - 1(\alpha_{js}(t))). \quad (3)$$

Аргументы единичных функций  $\alpha_{j,s-1}(t)$  и  $\alpha_{js}(t)$  характеризуют моменты начала и конца действия функции  $f_{js}(t)$ , представляющей собой выходное напряжение преобразователя в  $s$ -й зоне  $j$ -го интервала, содержащего  $r$  зон

$$\alpha_{js}(t) = \omega(t - t_{js}); \quad \alpha_{j,s-1}(t) = \omega(t - t_{j,s-1}), \quad (4)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота сети;  $t_{j,s-1}$ ,  $t_{js}$  – моменты начала и конца действия функции  $f_{js}(t)$ .

В режиме прерывистых токов в каждом интервале выделяются две зоны и в формуле (3)  $r = 2$ , при этом  $s = 1$  соответ-

ствуует токовой,  $s = 2$  бестоковой зоне  $j$ -го интервала дискретности;  $t_{j_s}$  ( $s = 0, 2$ ) - соответственно моменты начала интервала дискретности ( $s = 0$ ), окончания токовой ( $s = 1$ ) и бестоковой ( $s = 2$ ) зон.

В токовой зоне  $j$ -го интервала ( $t_{j_0} \leq t \leq t_{j_1}$ ) выходное напряжение преобразователя

$$f_{i1}(t) = \sin \beta_j(t),$$

где  $\beta_j(t) = \vartheta_{\text{о.нач}} + \alpha_{j_0}(t)$ ;  $\alpha_{j_0}(t) = \omega(t - t_{j_0})$ ;  $\vartheta_{\text{о.нач}}$  - угол открывания на первом интервале дискретности.

В бестоковой зоне ( $t_{j_1} \leq t \leq t_{j_2}$ ,  $i = 0$ ,  $di/dt = 0$ ) получим соотношение  $f_{j_2}(t) = \epsilon(t)$  или, как это следует из уравнения (2),

$$f_{j_2}(t) = \epsilon(t_{j_1}) - i_c T_M^{-1}(t - t_{j_1}).$$

При расчете рассматриваемого режима все слагаемые в (3) отличны от нуля. Продолжительность токовых зон интервалов

$$\lambda_j = \omega(t_{j_1} - t_{j_0}) \neq 1_j \quad \text{при } j = \overline{1, n}.$$

В результате решения системы (1)-(2) для ОУ без согласующего трансформатора при ненулевых начальных условиях и  $T_M \neq 4T$  получим для  $N$ -го интервала:

для токовой зоны

$$\epsilon_{N1}(t) = -i_c + \Phi_{N1}(t, 0) + s_{N1}^1 e^{p_1 t} - s_{N1}^2 e^{p_2 t}; \quad (5)$$

для бестоковой зоны

$$\epsilon_{N2}(t) = -i_c + \Phi_{N2}(t, 0) + s_{N2}^1 e^{p_1 t} - s_{N2}^2 e^{p_2 t}, \quad (6)$$

где  $p_\nu$  ( $\nu = 1, 2$ ) - корни характеристического уравнения

$$T_M T_p^2 + T_p + 1 = 0.$$

$$\text{Здесь } \Phi_{Ns}(t, 0) = \sum_{\nu=1}^2 (-1)^\nu I_{Ns}^\nu(t, 0);$$

$$s_{N1}^\nu = \epsilon_*^\nu + I_{N1}^\nu(0, -t_{N0}) + \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{s=1}^2 (I_{js}^\nu(0, -t_{j,s-1}) - I_{js}^\nu(0, -t_{js}));$$

$$s_{N2}^\nu = s_{N1}^\nu + J_{N2}^\nu(0, -t_{N1}) - I_{N1}^\nu(0, -t_{N1});$$

$$i_{N1}^v(t, \xi) = e^{p_v \xi} (p_v^2 + \omega^2)^{-1} (\omega \cos \varphi_N(t, \xi) - p_v \sin \varphi_N(t, \xi));$$

$$i_{N2}^v(t, \xi) = q p_v^{-1} e^{p_v \xi} (\epsilon_{N1}(t_{N1}) - i_c T_M^{-1}(t - \xi - t_{N1}) + p_v^{-1});$$

$$\varphi_N(t, \xi) = \omega(t - \xi) + \varphi_{ON} - (N - 1) \frac{2\pi}{m};$$

$m$  - пульсность ТП.

Выражение для тока в токовой зоне ( $s = 1$ ) получим, используя уравнение (2) и соотношение (5)

$$i_{N1} = i_c + T_M \left( \frac{d}{dt} \Phi_{N1}(t, 0) + p_1 s_{N1}^1 e^{p_1 t} - p_2 s_{N2}^2 e^{p_2 t} \right). \quad (7)$$

На основании выражений (5)-(7) составлены алгоритмы и программа расчетов на ЦВМ. По данным расчетов, кроме указанных зависимостей, были определены длина активной зоны ( $\lambda$ ), коэффициент использования двигателя по току ( $K_{\tau}$ ); среднее значение тока и максимальное и минимальное значения скорости двигателя на интервале дискретности в переходном (пуск двигателя) и установившемся режимах.

Кроме того, был проведен сравнительный анализ изменения фазовых координат при пуске двигателя при скачке угла открывания ТП и в случае использования оптимальной пусковой диаграммы тока, соответствующей оптимальному по быстродействию переходному процессу [2]. Формирование прямоугольной пусковой токовой диаграммы производилось путем поиска максимального мгновенного значения тока в пределах каждого интервала дискретности, ограниченного допустимым значением. Характер управления формировался так, чтобы процесс не имел перерегулирования.

Расчеты производились для следующих значений параметров ОУ:  $T = 0,0004-0,02$  с;  $T_M = 0,006-0,1$  с;  $m = 2, 3, 6$ ;  $i_c = 0,01-0,1$ .

В качестве примера на рис. 2 и 3 приведены графики переходных процессов при  $T = 0,0025$  с;  $T_M = 0,025$  с;  $m = 3$ ;  $i_c = 0,05$ ;  $\varphi_0 = 110^\circ$  эл. (в установившемся режиме) в функции номера интервала дискретности ( $n$ ). Переходные процессы рассчитаны при одинаковых максимальных значениях тока при пуске ( $i_M = 0,4$ ).

В режиме прерывистых токов с уменьшением длины активной зоны увеличивается эквивалентное значение сопротивления главной цепи, поэтому динамика электропривода определяется возрастающей электромеханической постоянной времени электропривода, которую назовем эквивалентной электромеханической постоянной времени –  $T_M$ .

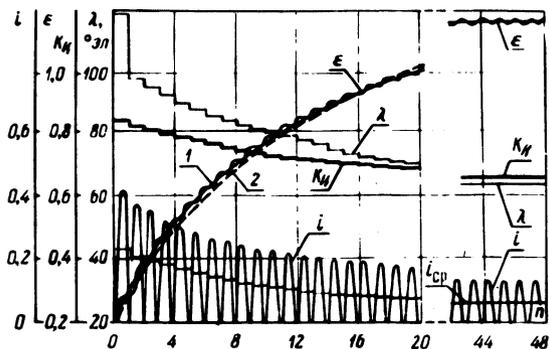


Рис. 2. Пуск электродвигателя при скачке угла открывания преобразователя.

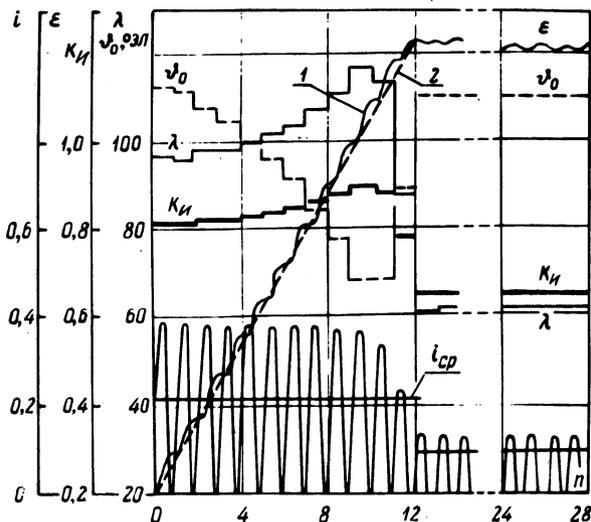


Рис. 3. Пуск электродвигателя при формировании оптимальной пусковой токовой диаграммы.

Рис. 4. Определение эквивалентной постоянной времени переходного процесса в режиме прерывистых токов.

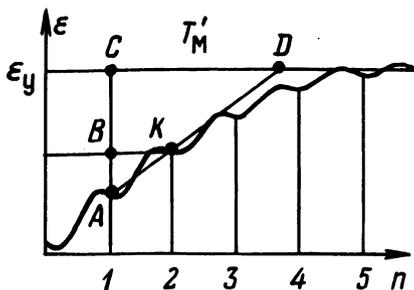
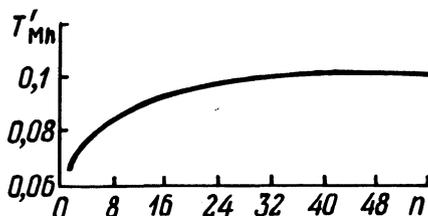


Рис. 5. Изменение эквивалентной электрохимической постоянной времени привода при пуске двигателя.



Методику определения  $T'_M$  на  $n$ -м интервале дискретности иллюстрирует рис. 4, где  $\epsilon_y$  - скорость в установившемся режиме;  $\epsilon_{n-1}$  и  $\epsilon_n$  - в начале  $(n-1)$  и  $n$ -го интервалов дискретности. Так как  $T'_{Mn} = CD$ , то из подобия треугольников следует

$$T'_{Mn} = \frac{2\pi}{m\omega} \cdot \frac{\epsilon_y - \epsilon_{n-1}}{\epsilon_n - \epsilon_{n-1}}.$$

На рис. 5 представлено изменение  $T'_{Mn}$  при пуске электропривода с параметрами  $T = 0,0025$  с;  $T_M = 0,025$  с;  $m = 3$ ;  $\varphi_0 = 110^\circ$  эл.

Увеличивающаяся в режиме прерывистых токов  $T_M$  обуславливает при скачке угла открывания вентилей ТП изменение скорости двигателя по экспоненте. Поэтому скорость двигателя в конце  $n$ -го интервала дискретности можно определить по выражению

$$\epsilon_{kn} = \epsilon_y + (\epsilon_{On} - \epsilon_y) e^{-\frac{t_{ин}}{T'_{Mn}}} \quad (8)$$

где  $\epsilon_{On}$  - скорость в начале  $n$ -го интервала дискретности;  $t_{ин}$  - время интервала дискретности.

Выражение (8) дает возможность с высокой степенью точности построить переходный процесс в режиме прерывистых то-

ков при скачке угла открывания (рис. 2, кр. 1 – изменение среднего на интервале дискретности значения скорости, кр. 2 – построена по выражению (8)).

### Литература

1. Анхимюк В.Л., Караульная Л.Ф., Новицкая В.А. Исследование переходных процессов вентильного электропривода с фазовым управлением методом обобщенных функций. – Изв. вузов СССР. Энергетика, 1973, № 12, с. 50–56.
2. Анхимюк В.Л., Новицкая В.А. Машинный синтез управления, обеспечивающего оптимальность переходного процесса вентильного электропривода с учетом дискретности преобразователя. – Изв. вузов СССР. Электромеханика, 1979, № 5, с. 401–406.

## ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.22:338

П.Н.Кнотько, инженер, В.И.Трутаев, инженер,  
Т.М.Гурбан, инженер, Б.В.Яковлев, канд. техн. наук  
(ВНИПИэнергопром)

### ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАНЕВРЕННЫХ ТЭЦ

В последние годы проблема покрытия переменной части графика электрических нагрузок в энергосистемах значительно обострилась. Это обострение во многом вызвано тем, что традиционно используемые в этой части графика энергоустановки в основном исчерпали свои маневренные возможности и возникла необходимость привлекать к регулированию электроснабжения базовые ТЭЦ и АЭС и создавать новые маневренные мощности. В этих условиях большое практическое значение приобретает высказанная еще в середине 70-х годов идея широкого использования теплофикационных агрегатов ТЭЦ в маневренном режиме за счет принудительной разгрузки отборов и передачи тепловой нагрузки потребителей непосредственно на котлоагрегаты. Такое использование ТЭЦ в регулировании электроснабжения сопровождается сокращением выработки электроэнергии по теплофикационному циклу, требует дополнительных устройств и операций по переключению тепловой нагрузки и нуждается в обстоятельных технико-экономических расчетах и обоснованиях. Подобные исследования проводятся в институте ВНИПИэнергопром.

В работах [1, 2] рассмотрена экономическая эффективность использования ТЭЦ в маневренном режиме с принудительной разгрузкой отборов при условии замещения их в базовой части графика нагрузок атомными станциями и вытеснения из полупиковой зоны графика маневренных конденсационных энергоблоков на органическом топливе. В работах использованы конкретные стоимостные показатели установок и энергоресурсов, принимаемые в настоящее время при проектировании, и сделан вывод об эффективности этого мероприятия во всех энергосистемах Европейской части СССР, имеющих достаточно высокую долю ТЭЦ и

значительный ввод мощности на АЭС. В то же время исследования вопроса показали большую зависимость совокупного эффекта названного мероприятия от соотношения стоимостных показателей ядерной энергетики и энергетики на органическом топливе как от местных, так и региональных условий. Поскольку технико-экономические показатели обычных и ядерных энергоустановок, а также стоимости органического топлива и ядерного горючего имеют разную достоверность (вследствие методической и информационной несопоставимости, обусловленной недостаточным опытом применения ядерной энергетики), было признано целесообразным исследовать влияние изменения названных показателей на величину эффекта и определить их экономически предельные значения в условиях конкретной энергосистемы. С этой целью на основании детального анализа покрытия перспективных графиков электрической нагрузки объединенных энергосистем Северо-Запада, Средней Волги и Центра была разработана структурная схема технико-экономических исследований (рис. 1), предусматривающая замещение переводимых в полупиковый режим базовых ТЭЦ и КЭС атомными конденсационными электростанциями и соответствующее сокращение специальных

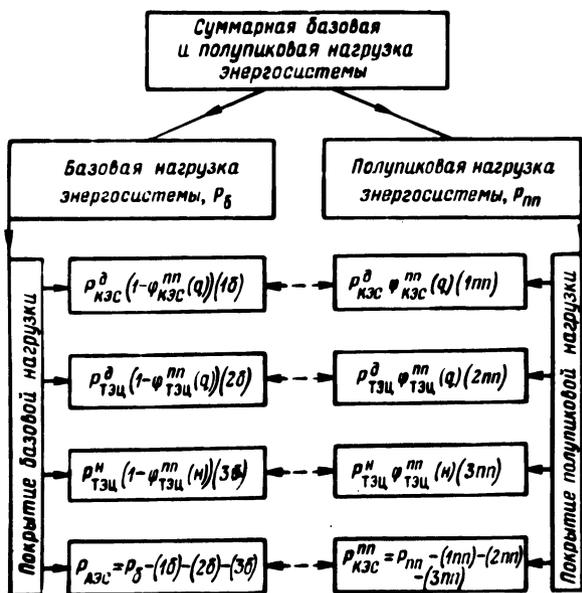


Рис. 1. Схема технико-экономических связей в вариантах перевода базовых КЭС и ТЭЦ в маневренный полупиковый режим.

полуликовых КЭС на органическом топливе. Для исследований была разработана также целевая функция суммарных приведенных затрат, в которой в качестве варьируемых величин выступают удельные приведенные затраты на АЭС, ядерное горючее и коэффициенты, характеризующие график электрической нагрузки и структуру генерирующих мощностей в рассматриваемой энергосистеме. Суммарные приведенные затраты определяются в зависимости от доли суммарной мощности каждой категории базовых энергоустановок, переводимых в полуликовый режим. По всем остальным величинам, имеющим более определенный и устойчивый характер, принимались конкретные значения на основании нормативов проектных разработок и данных эксплуатации. Расчеты и исследования проводились применительно к объединенной энергосистеме Северо-Запада, общее выражение затрат для которой после подстановки значений неварьируемых показателей имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 Z_{\Sigma} = & 82,19 + (z_{\text{АЭС}} + 2,52z_{\text{яг}} + 82,19)\alpha_6 + \\
 & + \alpha_{\text{ГРЭС}}^{\partial} [90,84 - 2,52z_{\text{яг}} - z_{\text{АЭС}} - \varphi_{\text{ГРЭС}}^{\partial} (111,51 - \\
 & - 2,52z_{\text{яг}} - z_{\text{АЭС}})] + \alpha_{\text{ТЭЦ}}^{\partial} [82,78 - 2,52z_{\text{яг}} - z_{\text{АЭС}} - \\
 & - \varphi_{\text{ТЭЦ}}^{\partial} (104,15 - 2,52z_{\text{яг}} - z_{\text{АЭС}})] + \alpha_{\text{ТЭЦ}}^{\text{H}} [97,54 - \\
 & - 2,52z_{\text{яг}} - z_{\text{АЭС}} - \varphi_{\text{ТЭЦ}}^{\text{H}} (102,37 - 2,52z_{\text{яг}} - z_{\text{АЭС}})],
 \end{aligned}$$

где  $z_{\text{АЭС}}$ ,  $z_{\text{яг}}$  - удельные приведенные затраты в АЭС и ядерное горючее соответственно, руб/кВт и руб/т.у.т.;  $\alpha_6$  - доля базовой нагрузки в сумме максимальной базовой и полуликовой электрической нагрузки энергосистемы;  $\alpha_{\text{ГРЭС}}^{\partial}$ ;  $\alpha_{\text{ТЭЦ}}^{\partial}$ ;  $\alpha_{\text{ТЭЦ}}^{\text{H}}$  -

доля действующих ГРЭС, ТЭЦ и новых ТЭЦ в общей мощности базовых и полуликовых мощностей энергосистемы, для которых технически возможен перевод в полуликовый режим;  $\varphi_{\text{ГРЭС}}^{\partial}$ ;  $\varphi_{\text{ТЭЦ}}^{\partial}$ ;  $\varphi_{\text{ТЭЦ}}^{\text{H}}$  - доля мощности действующих ГРЭС, ТЭЦ и новых ТЭЦ, переводимых в полуликовый режим.

В процессе исследований ставились задачи:

а) определить экономическую последовательность и абсолютную экономическую эффективность перевода базовых ТЭЦ и ГРЭС в маневренный полуликовый режим;

б) выявить влияние затрат на АЭС и ядерное горючее на эффективность перевода ТЭЦ и ГРЭС в маневренный режим;

в) определить экономически предельные значения затрат на АЭС и ядерное горючее, при которых перевод ТЭЦ и ГРЭС в полуликовый режим становится неэффективным.

В качестве базовых значений экономических показателей для АЭС принимались удельные капиталовложения 270 руб/кВт и затраты на ядерное горючее 11 руб/т.у.т. Результаты расчетов представлены на рис. 2 и 3 и в табл. 1. Они говорят о том, что при указанных базовых значениях затрат в АЭС перевод

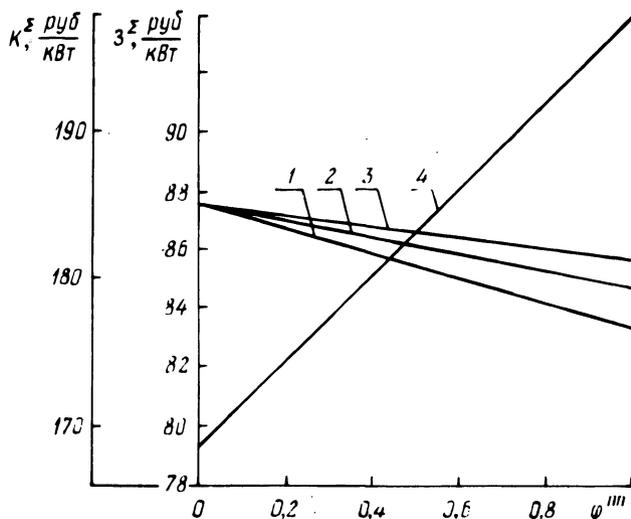


Рис. 2. Зависимость суммарных удельных приведенных затрат в энергосистеме от доли мощности действующих КЭС (1), действующих ТЭС (2) и новых ТЭС (3), переводимых в маневренный полупиковый режим. Линия (4) — дополнительные удельные капиталовложения в энергосистеме.

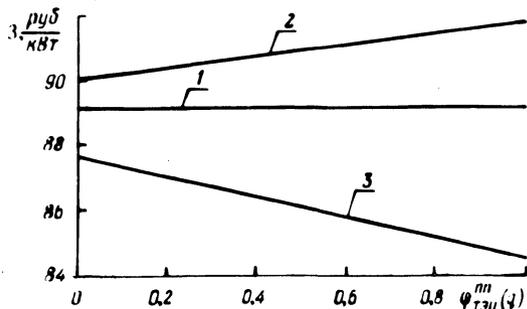


Рис. 3. Зависимость суммарных удельных приведенных затрат в энергосистеме от доли мощности действующих ТЭС, переводимых в маневренный полупиковый режим при различных затратах на ядерное горючее: 1 — при затратах на ядерное горючее 16,8; 2 — 20; 3 — 11 руб/т.у.т.

Таблица 1.

Экономические показатели использования базовых ТЭС  
и ГРЭС в маневренном полупиковом режиме

Категория электростанций	Экономия затрат на 1 руб. капиталовложений в энергосистеме, коп.	Экономически предельные затраты в атомной энергетике, при которых перевод в полупик неэффективен	
		на ядерное горючее, руб /т.у.т.	на АЭС, руб /кВт*
Действующие ГРЭС	15	19,6	84/380
Действующие ТЭС	10	16,8	76/350
Новые ТЭС	9	16,0	75/340

\* Числитель - приведенные затраты; знаменатель - удельные капиталовложения.

блочных конденсационных энергоблоков мощностью 150-300 тыс. кВт и теплофикационных агрегатов ТЭС с отбором пара в условиях ОЭС Северо-Запада экономически оправдывается. При этом наибольшая эффективность получается при переводе в маневренный режим действующих КЭС, затем действующих ТЭС и наименьшая - новых ТЭС. В связи с повышенными капиталовложениями в атомную энергетику перевод всех названных электростанций сопровождается ростом капитальных вложений по энергосистеме (рис. 2). В табл. 1 показана экономия суммарных затрат в энергосистеме на 1 руб. капиталовложений.

Из рис. 2, 3 и табл. 1 видно, что стоимость ядерного горючего и затраты в АЭС оказывают достаточно сильное влияние на эффективность использования базовых ТЭС и ГРЭС в маневренном полупиковом режиме. При примерном удвоении затрат на ядерное горючее такое использование становится абсолютно неэффективным. Экономически предельные значения затрат по атомной энергетике дифференцируются по категориям переводимых в полупиковый режим энергоустановок и превышают принимаемые в настоящее время значения примерно в 1,25-1,4 раза по затратам в АЭС и в 1,45-1,75 раза по затратам на ядерное горючее.

#### Литература

1. Развитие теплоэлектроцентралей на новом этапе / В.П.Корытников, М.И.Гитман, Я.А.Ковылянский, И.А.Смир-

нов. - Электрические станции, 1979, № 11, с. 16-22.  
 2. М.И.Гитман, Г.А.Маслова. Зависимость технико-экономических показателей ТЭИ от глубины разгрузки в минимум электрических нагрузок. - Электрические станции, 1980, № 6, с. 53-58.

УДК 66.074.8

Л.В.Шатон, инженер, В.И.Чернышев, инженер,  
 А.П.Несенчук, канд. техн. наук (БПИ)

### ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ДЕСОРБЦИИ УГЛЕКИСЛОТЫ ИЗ ЧАСТИЦ ЦЕОЛИТА СаА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В десорберах, использующих принцип псевдооживления мелко-дисперсного сорбента потоком десорбируемого газа [1], частицы сорбента нагреваются в процессе соприкосновения с греющей поверхностью. При этом каждая частица получает тепловой импульс, энергия которого частично рассеивается в процессах межфазовой релаксации, а частично компенсирует энергию, поглощаемую в процессе отрыва молекул сорбата от поверхности сорбента. Кинетика охлаждения частицы целиком определяет скорость выделения газообразного сорбата.

Коэффициент диффузии выражается зависимостью [2]

$$D = D_0 e^{-\frac{E_a}{RT}}, \quad (1)$$

где в числителе экспоненты содержится энергия взаимодействия молекулы сорбата с поверхностью цеолита  $E_a$ , а  $D_0$  определяется внутренней структурой кристалла цеолита. Для системы углекислота — цеолит СаА обе величины исследованы мало. Кроме того, до настоящего времени практически не исследован процесс переноса тепла внутри кристаллов цеолита, определяемый коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{эфф}$ . Эти обстоятельства вызвали необходимость экспериментального исследования кинетики десорбции при импульсном тепловом воздействии.

Математическая формулировка процессов переноса массы сорбата и энергии внутри сферической частицы радиуса  $R_0$  в сферических координатах представляется так:

$$\frac{da}{dt} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} r^2 D_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \frac{da}{dr}; \quad (2)$$

$$\rho_{\tau c} \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} r^2 \lambda \frac{dT}{dr} + \rho_{\tau E} \frac{da}{dt}, \quad (3)$$

где  $a$  - плотность сорбата, отнесенная к плотности твердого сорбента.

Записываем начальные и граничные условия

$$a \Big|_{r \leq R_0} \Big|_{t=0} = a_0; \quad \frac{da}{dr} \Big|_{r=0} = 0; \quad a \Big|_{r=R_0} = 0; \quad (4)$$

$$\Big|_{t \geq 0} \Big|_{r=0} = 0; \quad \Big|_{t \geq 0} \Big|_{r=R_0} = 0;$$

$$T \Big|_{r \leq 0} \Big|_{t=0} = T_0; \quad \frac{dT}{dr} \Big|_{r=0} = 0; \quad T \Big|_{r=R_0} = \begin{cases} T_H & \text{для } 0 \leq t \leq t_H; \\ T_0 & \text{для } t > t_H. \end{cases} \quad (5)$$

Эти условия выражают процесс релаксации концентрации сорбата в частице от начальной концентрации  $a_0$  в вакуум. Кроме того, на частицу воздействует импульс температуры с амплитудой  $T_H$  и длительностью  $t_H$ .

Система (2)-(5) отличается сильной нелинейностью и решалась численно на ЕС ЭВМ.

Схема экспериментальной установки для исследований десорбции при импульсном тепловом воздействии изображена на рис. 1.

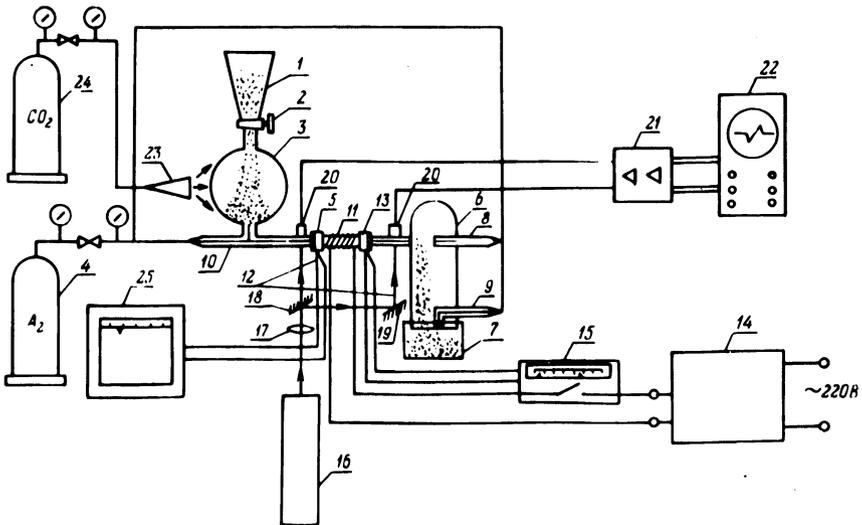


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки.

Методика эксперимента заключалась в следующем. Частицы СаА, заранее прокаленные в печи при температуре 350–400°C и насыщенные углекислотой до значения  $a$ , засыпались с помощью воронки 1 в верхний сосуд 3, заполненный аргоном. Аргон в сосуд 3 поступал из баллона 4. В эксперименте использовались частицы со средним диаметром порядка 0,3 мм. Сосуд 3 в ходе эксперимента охлаждался углекислотой, поступающей через сопло 23 из баллона 24. Аргон из баллона 4 поступает в трубку 10, увлекая за собой частицы из сосуда 3. Частицы цеолита, проходя нагревательный участок 5, попадают в нижний сосуд 6 и бюкс 7. Трубка 11, сосуд 6 и бюкс 7 охлаждаются аргоном с помощью трубок 8 и 9. Диаметр каналов 10, 5 и 11 составляет 0,5 мм (приблизительно равен диаметру частицы), что обеспечивает хороший тепловой контакт частиц со стенками канала 5, который выполнен из латуни. Канал 5 обогревается помещенным на его внешней стороне нагревателем, подключенным к регулируемому мосту 15 и источнику тока 14. Температура канала фиксируется двумя термомпарами 12, одна из которых подключена к регулируемому мосту 15, а другая к потенциометру 25. Канал 5 теплоизолирован от элементов 10 и 11 с помощью специальных прокладок 13. Время  $t_H$  пролета частицы по каналу 5 регистрировалось фотометрическим способом. Луч лазера 16 фокусировался линзой 17 на датчиках 20. Луч раздваивался полупрозрачными 18 и обычными 19 зеркалами. Раздвоенный луч проходит через центры трубок 10 и 11 так, что каждая пролетающая частица создает тень на фототранзисторах 20. Для более четкой регистрации частиц в схему встроены блок нормирования импульсов, обеспечивающий стандартную длительность и амплитуду каждого импульса, поступающего на осциллограф 22.

В ходе эксперимента порция частиц из сосуда 3 продувалась аргоном через каналы 10, 5 и 11 в бюкс 7. Время эксперимента фиксировалось секундомером.

В течение эксперимента частица теряла некоторое количество углекислоты, которое определялось двумя факторами: все частицы в каналах 10, 5 и 11 и сосудах 6 и 7 находились под практически нулевым парциальным давлением (по углекислоте) за счет интенсивного продувания аргоном и, кроме того, скорость десорбции определяется температурой.

Среднюю степень десорбции определяли в конце эксперимента посредством двух взвешиваний сосуда 7 с частицами цеолита с промежуточным прокаливанием их в нем.

Результаты серии экспериментов приведены в табл. 1. Их обработка выполнялась в соответствии с (2)-(5), а также полученным авторами ранее выражением для коэффициента диффузии

$$D = 1,41 \cdot 10^{-6} e^{-\frac{29750}{8,314T}} \quad (6)$$

Расчеты показали, что коэффициент теплопроводности цеолита близок к коэффициенту теплопроводности песка. Профиль температуры в частицах диаметром  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  м релаксирует за

Таблица 1.  
Сравнение результатов экспериментов и численной модели десорбции при импульсном нагреве

Температура канала 5 $T_n^P, C$	Время эксперимента, $t_{\text{эксп}}, c$	Степень десорбции (экспериментальные значения) $a_{\text{эксп}}, \frac{\text{кг CO}_2}{\text{кг CaA}}$	Степень десорбции (расчетные значения) $a_{\text{расч}}, \frac{\text{кг CO}_2}{\text{кг CaA}}$	$\frac{a_{\text{эксп}} - a_{\text{расч}}}{a_0}, \%$
$a_0 = 0,0825, t_n = 0,6 c$				
25	196	0,0305	0,0335	-3,6
150	180	0,0306	0,0304	+0,2
200	173	0,0264	0,0260	+0,5
250	152	0,0228	0,0207	+2,5
300	152	0,0134	0,0138	-0,5
350	122	0,0142	0,0088	+6,5
$a_0 = 0,0615, t_n = 0,1 c$				
25	95	0,0300	0,0344	-7,1
150	117	0,0309	0,0312	-0,5
200	108	0,0273	0,0308	-5,7
250	109	0,0295	0,0288	+1,1
300	108	0,0278	0,0262	+2,6
350	121	0,0252	0,0224	-5,7
$a_0 = 0,0335, t_n = 0,1 c$				
25	102	0,0180	0,0183	-0,9
150	105	0,0165	0,0173	-3,3
200	112	0,0192	0,0166	+7,7
250	108,5	0,0152	0,0157	-1,5
300	94	0,0147	0,0148	-0,3
350	118	0,0124	0,0123	+0,3

время порядка сотых долей секунды. Все это указывает, что нет необходимости включать в расчеты уравнения (3) и (5), а использовать приближение тепловой релаксации и балансные соотношения энергии при определении температуры частиц. Влияние теплоты десорбции на кинетику процесса проявляется только при нагреве частиц с коэффициентом внешнего теплообмена менее  $100 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ . Время же диффузионной релаксации сильно зависит от температуры частиц и на несколько порядков превышает время тепловой релаксации.

### Литература

1. Романюк В.Н., Несенчук А.П. Интенсификация непрерывного процесса тепловой десорбции. – Рукопись деп. в ВИНТИ. – М., 1979, № 6. – 77 с. 2. Брек Д. Цеолитовые молекулярные сита. – М.: Мир, 1976.

УДК 662.76

В.С.Северянин, канд. техн. наук,  
М.Г.Горбачева, инженер (БИСИ)

### ОБ ЭМИССИИ ОКИСЛОВ АЗОТА ПРИ ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ГОРЕНИИ

Известно, что концентрация окислов азота в продуктах сгорания зависит от температуры факела, времени пребывания газов в зоне высоких температур, от содержания кислорода в зоне горения [1]. Наибольшее влияние на выход окислов азота оказывает температура [2]:

$$C_{\text{NO}} = 4,6 \sqrt{C_{\text{O}_2} \cdot C_{\text{N}_2}} \exp\left(-\frac{21500}{R\theta}\right),$$

где  $C_{\text{NO}}$  – равновесная концентрация окиси азота;  $C_{\text{O}_2}$  и  $C_{\text{N}_2}$  – концентрация кислорода и азота в продуктах сгорания;  $\theta$  – температура в зоне реакции.

Одним из форсированных методов сжигания является пульсирующее горение. При этом способе сжигания топлива существенно снижается температура в зоне горения. Количественно это снижение можно охарактеризовать следующим образом.

Кинетическая энергия элементарной массы потока

$$dE = \frac{W^2}{2} dm,$$

где  $dm = \rho dV = \rho \cdot S \cdot W \cdot d\tau$ .

Здесь  $\rho$  - плотность газа;  $V$  - объем газа, прошедший со скоростью  $W$  поперечное сечение  $S$  камеры горения за время  $d\tau$ .

За время периода  $T$  пульсаций энергия стационарного потока

$$E_{ст} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot T \cdot W_{ср}^3;$$

кинетическая энергия осциллирующего потока

$$E_{осц} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot 4 \int_0^{\pi/2} W_a^3 \cdot \sin^3 \omega \tau d\tau = \frac{2}{3\pi} \rho \cdot S \cdot T \cdot W_a^3;$$

кинетическая энергия пульсирующего потока

$$\begin{aligned} E_{п} &= \frac{1}{2} \frac{\rho \cdot S}{\omega} \int_0^{2\pi} (W_{ср} + W_a \cdot \sin \omega \tau) d(\omega \tau) = \\ &= \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot T \cdot W_{ср}^3 + \frac{3}{4} \rho \cdot S \cdot T \cdot W_{ср} \cdot W_a^2. \end{aligned}$$

Здесь  $W_{ср}$  - среднерасходная скорость;  $W_a$  - амплитуда пульсаций.

Таким образом, для ускорения знакопеременного пульсирующего потока требуется больше энергии, чем для ускорения стационарного потока, на величину

$$\Delta E = \frac{3}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot T \cdot W_{ср} \cdot W_a^2.$$

По этой причине снижается энтальпия газового потока; относительное снижение энтальпии

$$\epsilon = \frac{E_{п} - E_{ст}}{E_{ст}} = \frac{3}{2} \left( \frac{W_a}{W_{ср}} \right)^2.$$

Температура также может снизиться на величину

$$\Delta T = \frac{\Delta E}{\Sigma v c},$$

где  $\Sigma v c$  - суммарная теплоемкость газов.

Таким образом, чем больше амплитуда переменной скорости  $W_a$  по сравнению со среднерасходной  $W_{ср}$ , тем большее относительное снижение температуры газа в камере.

Обычно при  $W_{ср} = 100-200$  м/с;  $W_a = 20-100$  м/с;  $\epsilon = 0,09$ , т. е. снижение температуры может быть примерно 10% или порядка  $100-150^\circ\text{C}$ .

Результаты эксперимента показаны на рис. 1. На этих графиках  $l$  - относительная длина канала;  $d$  - относительный по-

перечный размер (диаметр);  $q$  – тепловая нагрузка (расход топлива), при этом  $q_4 > q_3 > q_2 > q_1$ . При больших нагрузках на графиках имеется подъем, т. е. дожигание топлива смещается вниз по тракту. В этих опытах механический и химический недожог отсутствовал [3, 4].

Для дальнейшего снижения температуры в зону факела устройства пульсирующего горения можно вносить тепловоспринимающие поверхности нагрева [5]. Отмечается, что в этом случае режим схож с низкотемпературным горением в кипящем слое. Итак, при пульсирующем горении ощутимо снижена температура процесса без ухудшения технико-экономических показателей топки.

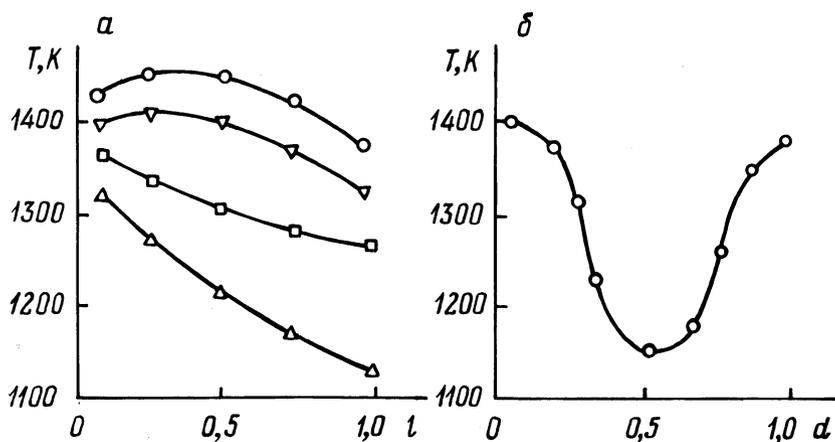


Рис. 1. Температурные поля в устройствах пульсирующего горения: а – по длине зоны горения; б – по диаметру камеры.

Время пребывания газов в зоне горения характеризуется скоростью потока (рис. 2). Обычные габариты (длина) устройства пульсирующего горения 1–3 м, поэтому время реагирования составляет сотые доли секунды (несмотря на удлиненную траекторию движения). По сравнению с обычными топочными устройствами время пребывания газов в зоне горения, таким образом, снижается на порядок.

Наконец, возможность ведения режима при коэффициенте избытка воздуха, близком к единице, с одной стороны, и чрезвычайная турбулизация потока внутри газового тракта устройства – с другой, ведут к очень малым концентрациям кислорода в зоне горения. Так, по данным [4], содержание  $O_2$  в камере

воспламенения по ее сечению в среднем составляло 2–3% и характеризовалось большой равномерностью по объему; на выхлопе при правильной организации пульсационного режима свободного кислорода не обнаруживалось. Значит, парциальное давление кислорода в зоне реакции при пульсирующем горении намного ниже, чем при стационарном горении.

Исследования, ведущиеся в Брестском инженерно-строительном институте по использованию пульсирующего горения, подтверждают достоинства этого метода сжигания с точки зрения уменьшения вредных выбросов.

При испытаниях воздухоподогревателя и разжижителя битума с камерами пульсирующего горения получены следующие данные (табл. 1).

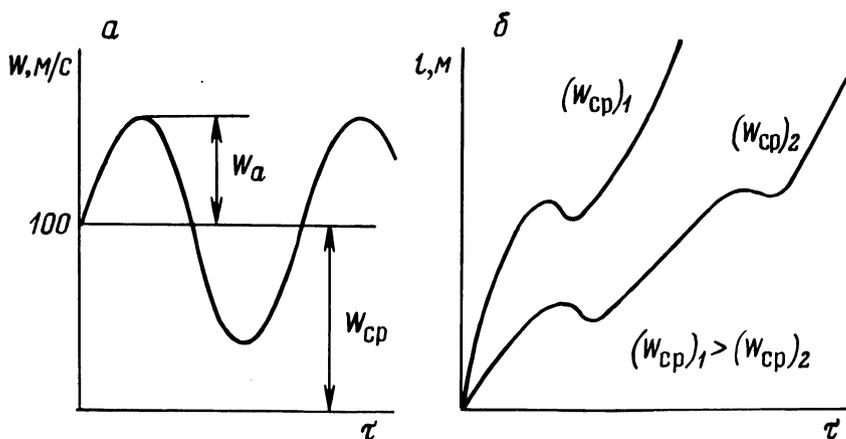


Рис. 2. Скорость газа (а) и траектория его движения (б) внутри устройства пульсирующего горения.

Таблица 1.

Содержание  $\text{NO}_x$  в выхлопе устройств пульсирующего горения

Тепловая нагрузка в % от номинальной	Содержание $\text{NO}_x$ , мг/м <sup>3</sup>	
	теплогенератор	разжижитель битума
30	35,7	26,9
50	39,5	28,0
80	44,8	30,0
100	61,8	35,0
110	74,0	52,0

Концентрация окислов азота по тракту устройства пульсирующего горения показана на рис. 3.

В этих опытах содержание  $\text{NO}_x$  определялось по известному методу ВТИ с использованием реактива Грисса.

При этом мощность и размеры описанных устройств незначительны.

В то же время размер (см. формулу Сигала [1]) влияет на  $\text{C}_{\text{NO}_x}$  в степени 0,8. Однако сопоставление с аналогичными устройствами стационарного горения ( $250\text{--}400 \text{ мг/м}^3$ ) при сжигании жидкого топлива без специальных мер подавления  $\text{NO}_x$  позволяет экстраполировать эту разницу в  $\text{NO}_x$  и на большие мощности.

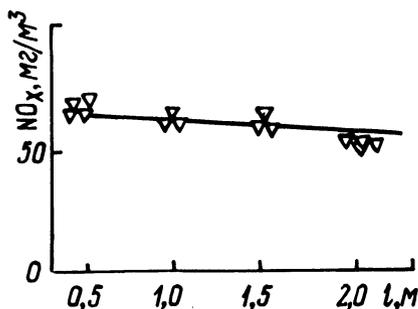


Рис. 3. Содержание окислов азота по тракту устройств пульсирующего горения.

Следует предположить, что при пульсирующем горении имеется фактор, действующий в сторону увеличения содержания  $\text{NO}_x$ . Это особые физико-химические условия в зоне реакции при пульсирующем горении, когда концентрация радикалов намного выше, чем в стационарном факеле. Поэтому можно ожидать увеличения  $\text{NO}_x$ , искусственно увеличив температуру и время пребывания реагентов в зоне реакции, а также увеличив избыток воздуха.

Устройства пульсирующего горения в предложенном виде, как генератор тепла и высокоскоростной струи газов, являются эффективным средством снижения окислов азота в продуктах сгорания.

### Литература

1. Кулиш О.Н. Предотвращение образования окислов азота в продуктах сгорания топлива. — В кн.: Итоги науки и техники, Сер. Топливный баланс. М.: ВИНТИ, 1980, т. 3, с. 32–37.
2. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменец-

кий Л.А. Окисление азота при горении. - М.-Л.: АН СССР, 1947. - 157 с. 3. Северянин В.С., Вербя М.И. Конвективный теплообмен в устройствах пульсирующего горения. - В сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики. Минск: Высшая школа, 1980, вып. 7, с. 58-61. 4. Кацнельсон Б.Д., Таракановский А.А. Исследования сжигания жидкого топлива в пульсирующем потоке. - В сб.: Высокофорсированные огневые процессы. М.-Л.: Энергия, 1967, с. 9-16. 5. Северянин В.С. О нагревателях с пульсирующим горением. - Изв. вузов. Энергетика, 1974, № 5, с. 9-13.

УДК 662.96:621.311.22.001

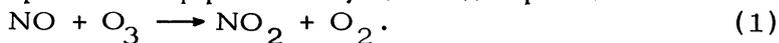
М.А.Маркевич, инженер, В.Н.Альшевский, инженер  
(ВНИПИэнергопром)

### ВЛИЯНИЕ ОЗОНА НА КОНВЕРСИЮ $\text{NO}$ В $\text{NO}_2$ В ДЫМОВОМ ФАКЕЛЕ ТЭС

В процессе сжигания органического топлива в топках энергетических котлов образуются окислы азота. При этом на выходе из дымовой трубы основная часть окислов азота находится в форме  $\text{NO}$  и лишь 1-8% в виде двуокиси азота [1]. По мере рассеивания дымовых газов, выходящих из дымовой трубы ТЭС, происходит химическое взаимодействие отдельных компонентов между собой и с атмосферным воздухом, в результате чего некоторые загрязняющие вещества, в том числе и  $\text{NO}_2$ , формируются в атмосферном воздухе. Действующими в СССР санитарными нормами регламентируется только приземная концентрация двуокиси азота, предполагая, что вся окись азота превращается в  $\text{NO}_2$  [2]. Для оценки реальной экологической нагрузки в зоне максимальных приземных концентраций необходимо знать истинное соотношение  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ , так как двуокись азота обладает большей токсичностью и реакционной способностью по сравнению с окисью азота.

Кинетика окисления  $\text{NO}$  в  $\text{NO}_2$  молекулярным кислородом при непрерывном разбавлении дымовых газов окружающим воздухом рассмотрена в [3]. Было показано, что по мере достижения факелом зоны максимальных приземных концентраций степень перехода  $\text{NO}$  в  $\text{NO}_2$  за счет молекулярного кислорода незначительна. Натурные исследования по составу дымового факела

ла [4–7] показали, что существенную роль в доокислении NO в NO<sub>2</sub> играет атмосферный озон, т. е. идет реакция



В условиях темновых часов суток (ночи) подмешивание новых порций окружающего воздуха в дымовой факел служит единственным источником пополнения озона. Время исчезновения озона в ядре факела оценивается всего в несколько секунд [8], что говорит о быстрой скорости взаимодействия атмосферного озона с окисью азота дымового факела. В [8] отмечается, что дефицит озона в ядре дымового факела от мощной тепловой электростанции наблюдается на большом расстоянии от дымовой трубы.

Нами сделана попытка оценить изменения концентрации окиси азота по оси дымового факела с учетом его степени разбавления воздухом и протекания химической реакции окиси азота с озоном, поступающим в ядро факела в результате его разбавления. На основании этого анализа определена доля конверсии окиси азота в двуокись азота. Для анализа выбрана конкретная ТЭС мощностью 3200 МВт, на которой сжигается экибастузский уголь. Высота дымовой трубы 250 м. Концентрация окиси азота на выходе из дымовой трубы принята 500 ррт (625 мг/м<sup>3</sup>). Содержание озона в атмосферном воздухе принято равным 0,05 ррт. Скорость ветра на уровне среза дымовой трубы принята 10 м/с. Для решения поставленной задачи использован метод конечных разностей. Модель расчетной схемы показана на рис. 1. Путь распространения дымового факела до 30 км разбивается на отдельные участки. В конце каждого отрезка вычисляется концентрация окиси азота за счет разбавления дымового факела воздухом по зависимости, вытекающей из формулы Саттона:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{127L_0}{v \cdot x^2 + 127 \cdot L_0} \left( 1 + e^{-\frac{4h^2}{c_z^2 \cdot x^{2-n}}} \right), \quad (2)$$

где  $C$ ,  $C_0$  – концентрация окиси азота в расчетной точке и на выходе из дымовой трубы соответственно, г/м<sup>3</sup>;  $L_0$  – количество выбрасываемых газов из дымовой трубы, м<sup>3</sup>/с;  $v$  – скорость ветра, м/с;  $x$  – расстояние от основания дымовой трубы до расчетной точки, м;  $h$  – геометрическая высота дымовой трубы, м;  $c_z$ ,  $n$  – коэффициенты, зависящие от метеорологиче-

ского состояния атмосферы. Нами выполнен анализ для условий устойчивого состояния атмосферы при небольшом температурном градиенте. Для этого случая  $n = 0$ ,  $c_z = 0,05$ . Исходя из зависимости изменения концентрации окиси азота по оси факела (рис. 1, линия 1), полученной из выражения (2), определена

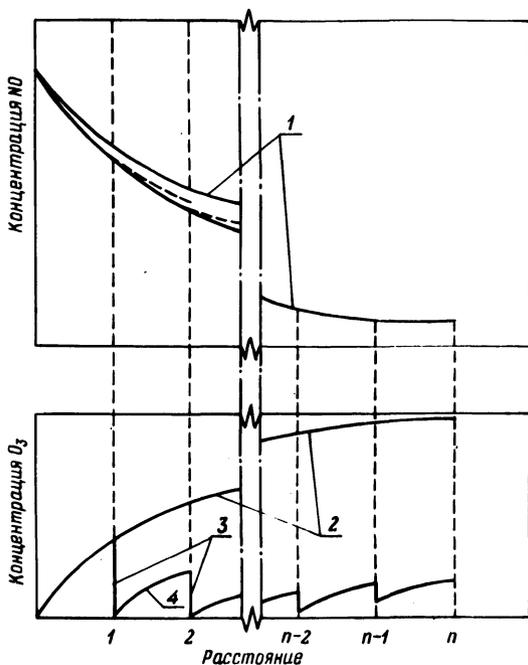


Рис. 1. Модель расчетной схемы изменения концентраций реагирующих веществ по оси дымового факела; 1,2 — соответственно изменение концентраций NO и O<sub>3</sub> по оси факела за счет разбавления; 3,4 — накопление и срабатывание озона на расчетном участке.

концентрация озона на оси факела при отсутствии химической реакции следующим образом:

$$C_{O_3} = C_{O_3}^{\text{фон}} (1 - K_{\text{исх}}), \quad (3)$$

где  $C_{O_3}$  — концентрация озона в расчетной точке;  $C_{O_3}^{\text{фон}}$  — фоновая концентрация озона;  $K_{\text{исх}}$  — отношение концентрации окиси азота в расчетной точке к концентрации ее на выходе из трубы.

Для принятых условий рассеивания дымовых газов при отсутствии химической реакции концентрация озона на оси факела (рис. 1, линия 2) практически достигла бы фоновой концентра-

ции на расстоянии одного километра (0,0486 ppm против фоновой 0,05 ppm).

В реальных условиях за счет протекания реакции окиси азота с озоном их концентрации будут иметь другие значения. Для расчета этих значений в принятой модели сделано допущение, что на расчетном участке за счет разбавления идет накопление озона, а в конце участка озон мгновенно срабатывается (рис. 1, линия 3) за счет реакции с NO, и его концентрация падает до нуля. На следующем участке снова идет накопление озона (рис. 1, линия 4), а в конце – мгновенное срабатывание. Концентрация озона на расчетном участке определялась из равенства

$$C_{O_3}^{уч} = C_{O_3}^{фон} (1 - K_{уч}), \quad (4)$$

где  $K_{уч}$  – отношение концентрации окиси азота на оси факела в конце расчетного участка к концентрации в начале данного участка, изменяющихся за счет разбавления факела без учета химической реакции на участке.

Анализ кинетики химической реакции (1) показал, что допущение о полном срабатывании озона правомерно на участке до 5 км. Так, например, если рассмотреть участок 2–3 км, то при условии концентрации озона в начале участка, равной нулю, ее концентрация в конце данного участка составит 0,0141 ppm. По реакции (1) 99,7% этого количества озона сработается за 5 с против 100 с – времени прохождения факелом расстояния протяженностью 1 км. В случае, когда за время пребывания дымового факела в расчетном участке по реакции (1) срабатывается менее 95% озона, степень превращения NO в NO<sub>2</sub> на рассматриваемом участке рассчитывалась с учетом неполного срабатывания озона на предыдущем участке. Расчеты показали, что такое явление имеет место на расстоянии более 20 км от дымовой трубы при максимальной нагрузке и 10 км – при минимальной нагрузке. При проведении последовательного расчета всех участков оси дымового факела нами получено изменение концентрации окиси азота по всей длине факела и степень конверсии окиси азота в двуокись азота за счет реакции с озоном.

На рис. 2 показано изменение соотношения концентрации двуокиси азота к общему количеству окислов азота (NO + NO<sub>2</sub>). Как видно из рисунка, на расстоянии максимальных приземных концентраций (4–6 км) по оси факела около 17% окиси азота переходит в двуокись азота при максимальной нагрузке ТЭС и 43% – при минимальной нагрузке. Полный переход окиси азота в двуокись азота происходит на значительном удалении от зоны

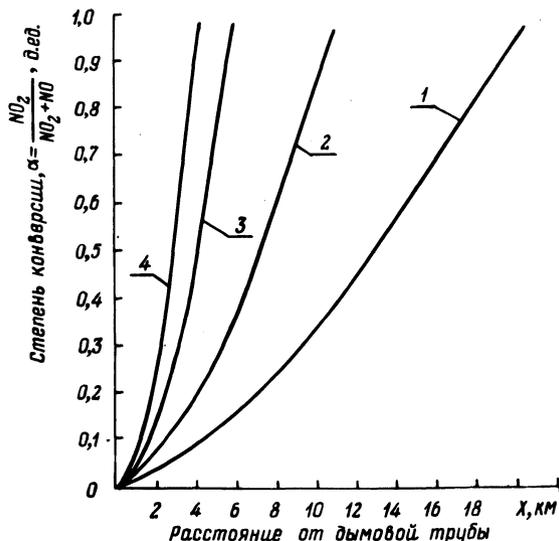


Рис. 2. Изменение степени доокисления NO в  $NO_2$  по длине дымового факела: 1,2 — соответственно при номинальной нагрузке ТЭС и 35%  $D_{ном}$  в ядре факела; 3,4 — то же, что 1 и 2 на половинном расстоянии между осью факела и его внешней границей.

максимальных приземных концентраций. В [3] отмечалось, что за счет окисления окиси азота атмосферным кислородом в зоне максимальных приземных концентраций в двуокись азота переходит около 3%. Следовательно, преобладающее влияние на конверсию окиси азота в двуокись оказывает реакция окисления озонном. В то же время проведенный анализ подтверждает необходимость корректировки определения экологической нагрузки ТЭС с учетом соотношения окиси азота и двуокиси в зоне максимальных концентраций и токсичности этих компонентов. Следует отметить, что изложенные в данной статье результаты относятся к оси дымового факела. В то же время по мере смещения от оси факела к его периферии вдоль поперечного сечения концентрация окиси азота падает, а озона возрастает. Следовательно, для точной оценки степени конверсии окиси азота в двуокись в заданном сечении следует учесть, что по сечению факела степень конверсии не остается постоянной: чем ближе рассматриваемая точка данного поперечного сечения к внешней границе дымового факела, тем выше степень конверсии окиси азота в двуокись.

## Литература

1. Энергетика и охрана окружающей среды / Под ред. Н.Г.Залогина, Л.И.Кроппа и Ю.И.Кострикина. - М.: Энергия, 1979. - 352 с.
2. Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий. СН-245-71.
3. Ермаков В.С., Внуков А.К. О степени перехода монооксида азота в двуокись при рассеивании дымовых газов котлоагрегатов. - Электрические станции, 1978, № 1, с. 14-15.
4. Davis D.D., Smith G., Klauber G. Trace gas analysis of power plant plumes via aircraft measurement;  $O_3$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$  chemistry.—Science, 186 (1974), 733-736.
5. Hegg D. Reactions of ozone and nitrogen oxides in power plant plumes. - Atmos. Environ., 11 (N 6), 1977, 521-526.
6. White W.H.  $NO_x$ - $O_3$  photochemistry in power plant plumes; comparison of theory with observation. - Environ. Sci. and Technol., 11 (10), 1977, 995-1000.
7. Melo O.T., Lusia M.A., Stevens R.D.S. Mathematical modelling of dispersion and chemical reactions in a plume oxidation  $NO$  to  $NO_2$  in the plume of a power plant. - Atmos. Environ., 12 (N 5), 1978, 1231-1234.
8. Сигал И.Я. Образование двуоксида азота при рассеивании дымовых газов. - Теплоэнергетика, № 11, 1980, с. 6-9.

УДК 62-50(0.75.8)

В.И.Литвинец, инженер, В.Б.Рубахин, канд. техн. наук,  
С.А.Михаленок, инженер (БПИ)

### МЕТОД СОПРЯЖЕНИЯ КОНТУРОВ ПРИ СИНТЕЗЕ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Практические опыт и исследование способов автоматизации технологического оборудования и взаимосвязанных производственных процессов показал, что в некоторых случаях для повышения качества поддержания основных технологических параметров целесообразно стремиться к достижению автономности локальных автоматизированных систем регулирования (АСР). Особенности осуществления автономности работы отдельных контуров посвящен ряд работ [1, 2].

Однако в [3, 4] отмечается, что автономность во многих случаях недопустима с точки зрения технологии процесса, и бо-

лее того в тех случаях, когда автономность не противоречит технологии, оптимизация процессов в отдельных контурах не обеспечивает оптимальности процесса в целом во всей системе управления.

Для современных энергоблоков характерны технологические режимы, а также наличие участков регулирования, требующих структурных решений на принципе взаимозависимости выходных параметров отдельных контуров. Рассмотрим метод определения структуры и параметров настройки АСР на примере двухсвязной системы, изображенной на рис. 1, а. Реально существующими

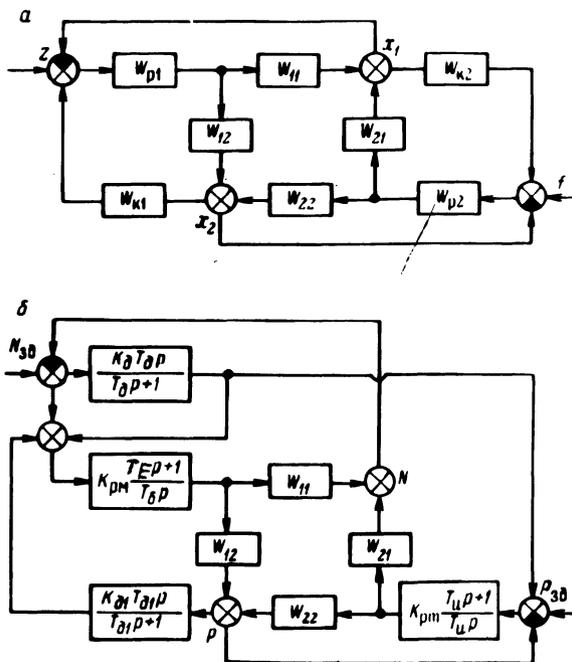


Рис. 1. Общий вид рассчитываемой двухсвязной системы (а) и структурная схема системы регулирования мощности энергоблока (б).

аналогами такой системы на энергоблоке являются система регулирования мощности с двумя основными регулируемыми параметрами (мощность и давление пара), АСР температуры среды в промежуточной точке и АСР процесса горения и др. Как правило, рассматриваемые контуры в двухсвязной системе объединены технологией ведения процесса и, следовательно, требуют согласования параметров настройки по единому критерию.

Используя формулу Мейсона в двухсвязной системе, находим передаточные функции АСР при возмущении  $z$  (или  $f$ ) для выходной переменной каждого контура. Предполагая, что переходный процесс в контурах оканчивается одновременно, отношения полученных передаточных функций допустимо приравнять к единице, так как критерием в данном случае является оптимум модуля передаточной функции замкнутой системы.

$$\frac{W_{zx1}}{W_{zx2}} = \frac{W_{p1} W_{11} (1 - W_{p2} W_{22}) - W_{p1} W_{12} W_{p2} W_{21}}{W_{p1} W_{12} (1 + W_{k2} W_{p2} W_{21}) + W_{p1} W_{11} W_{k2} W_{p2} W_{22}} \approx 1 \quad (1)$$

и

$$\frac{W_{fx1}}{W_{fx2}} = \frac{W_{p2} W_{21} (1 + W_{k1} W_{p1} W_{12}) + W_{p2} W_{22} W_{k1} W_{p1} W_{11}}{W_{p2} W_{22} (1 - W_{p1} W_{11}) - W_{p2} W_{21} W_{p1} W_{12}} \approx 1. \quad (2)$$

Упростив выражения (1) и (2), получим для регуляторов каждого контура определяющие зависимости

$$W_{p2} (1 + W_{k2}) = \frac{W_{11} - W_{12}}{W_{11} W_{22} + W_{12} W_{21}} \quad (3)$$

и

$$W_{p1} (1 + W_{k1}) = \frac{W_{22} - W_{21}}{W_{11} W_{22} + W_{12} W_{21}}. \quad (4)$$

Подстановка передаточных функций объекта, динамика контуров которого различна, например, для АСР мощности энергоблока

$$W_{11} = \frac{k_N}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}; \quad W_{12} = \frac{k'_p}{(T'_1 p + 1)(T'_2 p + 1)}$$

и

$$W_{22} = \frac{k_p (T_3 p + 1)}{T_4 p + 1}, \quad W_{21} = \frac{T_0 p (T_5 p + 1)}{(T_5 p + 1)(T_6 p + 1)} \quad (5)$$

дает следующие результаты:

для турбинного регулятора

$$W_{pT} (1 + W_{kT}) = \frac{k_{pT} (2T_d p + 1)}{T_p p + 1}; \quad (6)$$

для котельного регулятора мощности

$$W_{рм} (1 + W_{км}) = k_{рм} (2T_{дp} + 1)(T_{д1p} + 1) \frac{T_E T_{дp}^2 + 2k_N T_E p + 1}{T_E^2 p^2 + 2\xi T_E p + 1}, \quad (7)$$

где  $T_{д}$  - постоянная дифференцирования, общая для обоих контуров;  $T_{д1}$  - постоянная времени форсирующего звена;  $T_{и}$  - постоянная интегрирования регулятора турбины;  $T_E$  - постоянная интегрирования регулятора мощности;  $k_N$ ,  $k_p$ ,  $k'_p$  - коэффициенты передачи прямых и перекрестной связей между контурами;  $k_{рп}$ ,  $k_{рм}$ ,  $\xi$  - коэффициенты усиления регуляторов и коэффициент демпфирования.

В процессе упрощения выражений (3) и (4) после подстановки передаточных функций (5) в знаменателе остается характеристическая часть инерционного звена первого или второго порядка, являющаяся для преобразуемых отношений наименьшим общим делителем.

Анализ полученных выражений (6) и (7) позволяет определить в качестве предельного варианта структурной оптимизации для турбинного регулятора интегро-дифференцирующее (ИД) звено, а для котельного регулятора мощности - пропорционально-интегро-дифференцирующее (ПИД) звено, дополненное форсирующим элементом второго порядка. Поскольку величины  $T_{и}$  для турбинного регулятора и  $T_E$  для регулятора мощности с изменением динамики в функции нагрузки энергоблока изменяются незначительно, то для параметрической оптимизации АСР мощности достаточно производить коррекцию коэффициента усиления регулятора котлоагрегата (мощности) и постоянных дифференцирования  $T_{д}$  и  $T_{д1}$ .

В общем случае параметры настройки системы с требуемой точностью определяют из выражений:

$$T_{д} = T_6 / 2; \quad k_{д} = (k_N - k_p - k'_p) / k_N; \quad (8)$$

$$T_{и} = (k_p k_N T_3 T_6 + T_0 T'_1) / T_5; \quad k_{рп} = (k_N - k'_p) / k_N k_p; \quad (9)$$

для котельного регулятора мощности

$$T_E = \sqrt{k_p k_N T_3 T_6 + T_0 T'_1 T_1 / T'_1}; \quad k_{рм} = 1 / k_N, \quad (10)$$

где  $T'_1$  - приведенное значение малой постоянной времени передаточной функции  $W_{21}$  для расчетных уровней нагрузки.

Второй дифференциатор используется как форсирующее звено с компенсацией определенного спектра "паразитных" возмущений

со стороны регулятора турбины. Параметры его настройки определим по формулам

$$T_{д1} = T_3 T_5 T_6 / 2T_4 T'_э; \kappa_{д1} = T_{окд} / T_{д1 \kappa_p}. \quad (11)$$

Хорошие результаты дает эмпирическая формула

$$T_{д1} = (T_3 T_5 T_6 / 2T_4)^{2/3}, \quad (12)$$

позволяющая уменьшить погрешность вычислений, связанную с использованием приведенной  $T'_э$ .

Предлагаемый метод опробован на энергоблоках Лукомльской ГРЭС в системе регулирования мощности, структурная схема которой приведена на рис. 1, б. Применение его рекомендуется в АСР, основные контуры и выходные параметры которых определяют, например, экономичность установки. При этом автономность работы рассматриваемой системы обеспечивается только по отношению к второстепенным контурам.

Получая дополнительную возможность влиять на динамику поведения системы за счет взаимных связей, координированные контуры можно оптимизировать в соответствии с технологическими требованиями как одну многосвязную АСР.

#### Литература

1. Морозовский В.Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. - М.: Энергия, 1970. - 288 с.
2. Биленко В.А., Давыдов Н.И. Вопросы автономности в связанных двухконтурных системах автоматического регулирования современных энергоблоков. - Теплоэнергетика, 1979, № 12, с. 32-38.
3. Мееров М.В. Системы многосвязного регулирования. - М.: Физматгиз, 1965. - 384 с.
4. Мееров М.В., Литвак Б.Л. Оптимизация систем многосвязного управления. - М.: Наука, 1972. - 344 с.

УДК 536.244/66.021.93/66.074.7

А.М.Заватко, канд. техн. наук, Л.И.Тарасевич, канд. техн. наук, Г.А.Фатеев, канд. техн. наук (БПИ)

#### ТЕПЛОЙ РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ЦИКЛ В СИСТЕМЕ ЧЕТЫРЕХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПОТОКОВ

При термической обработке слоев дисперсного материала и газовых потоков целесообразно организовать взаимодействие между ними таким образом, чтобы потоки входили в реактор и

выходили из него примерно с одинаковыми температурами, а тепловые процессы замыкались внутри реактора.

На рис. 1 представлена схема четырех потоков, взаимодействие между которыми приводит к круговой рециркуляции тепла. Два потока  $s = 1; 3$  являются плотными слоями дисперсного материала, а два других  $q = 2; 4$  - потоками газа. Условия теплообмена заданы соответственно условиями тепловой регенерации адсорбционных систем

$$a_s = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; (\rho c)_s = 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

$$v_s = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}/\text{с}; (\rho v c)_g = 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\alpha_{s,g} = 30000 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}); \delta_g = 0,1 \text{ м},$$

где  $a, \rho, c$  - коэффициенты температуропроводности, плотность, удельная теплоемкость соответственно;  $v$  - скорость потока;  $\alpha$  - объемный коэффициент теплообмена;  $s = 1; 3; q = 2; 4$ .

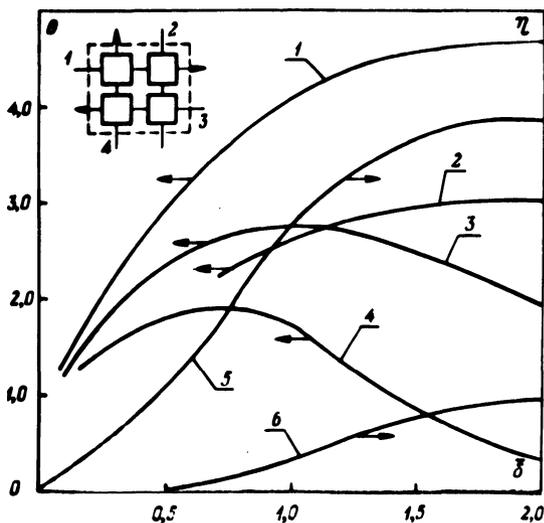


Рис. 1. Значения относительных температур в слое дисперсного материала на выходе из зоны теплообмена I на различных уровнях от основания слоя: 1 -  $\gamma = 0$ ; 2 - 0,5; 4 -  $\gamma = \delta$ ; 3 - среднеинтегральная температура в течении слоя; 5, 6 - относительные расходы тепла, переносимого слоем на выходе из зон I и II соответственно.

Газовые потоки между зонами I, IV и II, III перемещаются струйно без перемешивания и нагреваются за счет подвода тепла мощностью  $q_g = 40000 \text{ Вт}/\text{м}^2$  ( $q = 2; 4$ ), где  $q$  - удельная мощность нагревателя.

Перенос тепла в каждой зоне теплообмена описывается уравнением

$$v_s \frac{\partial t_s(y, x)}{\partial x} = a_{s,g} \frac{\partial^2 t(y, x)}{\partial y^2} - u_{s,g} \frac{\partial t_s(y, x)}{\partial y}, \quad (1)$$

где  $t$  - температура;  $x, y$  - продольная и поперечная координата слоя;

$$a_{s,g} = \frac{(\rho v c)_g^2 \alpha_{s,g}}{(\rho c)_s}; \quad u_{s,g} = \frac{(\rho v c)_g}{(\rho c)_s} \quad (s = 1; 3; g = 2; 4).$$

Интегрирование системы уравнений (1) выполнено методом прогонки на ЭКВМ 15BCM5. Результаты численного анализа представлены на рис. 1, где  $\theta$  - относительная температура ( $\theta = \frac{t - t_0}{t^*}$ );  $\delta$  - относительная высота потока ( $\bar{\delta} = \delta / \delta^*$ );

$\eta$  - отношение расхода тепла, переносимого потоком к мощности нагревателя ( $\eta = \frac{\rho v c (t - t_0)}{g}$ );  $t_0$  - исходная температура потока.

В основу выбора масштаба высоты слоя положено равенство тепловых эквивалентов дисперсного и газового потоков

$$(\rho v c \delta)_g = (\rho v c)_s \delta^* \quad (s = 1, g = 2).$$

Для принятых значений параметров  $\delta^* = 0,1$  м. За единицу масштаба температуры принято ее значение

$$t^* = \frac{q_g}{(\rho v c)_g} \quad (g = 2),$$

соответственно равно 200 К.

Как следует из рис. 1, поток тепла, циркулирующий в системе, может вчетверо превосходить мощность нагревателя (кривая 5). При номинальном значении средней температуры слоя ( $\bar{\delta}_s = 1$ ) тепловая эффективность составляет 2,7 (кривая 5). Слой дисперсного материала меняет относительную температуру с 0 на входе в реактор до 0,36 на выходе. В рабочей зоне реактора средняя температура слоя составляет 2,78. Газовый поток соответственно приобретает температуры 0 на входе; 3,14 - в рабочей зоне; 0,64 - на выходе из реактора.

Рассмотренный процесс может быть рекомендован в тех случаях, когда активация физико-химических превращений или равновесные соотношения достигаются при высоких температурах. Сами превращения являются малоэнергоемкими.

## СОДЕРЖАНИЕ

П р и м а В.М. Производство и потребление электроэнергии отраслями народного хозяйства СССР . . . . . 3

### Электроэнергетика

Ф е д и н В.Т., Л ы ч е в П.В. Повышение пропускной способности и эффективности использования токопроводящих материалов криогенных электропередач . . . . . 11

К о р о т к е в и ч М.А., Т р а в я н с к и й М.И. Применение метода множителей Лагранжа для определения рационального значения составляющих эксплуатационных расходов электрической сети . . . . . 16

П а д а л к о Л.П., Н а г о р н о в В.Н. Проблемы рационального покрытия переменной части графика электрической нагрузки энергосистемы . . . 21

К р ы с е н к о А.П. Выбор объема, очередности и мест установки устройств противоаварийной автоматики в распределительных сетях. . . . 26

С у щ е н о к Л.Р. Принципы нормирования затрат на передачу и распределение электроэнергии . . . . . 31

Ж е л е з н я к А.И., С е н ч у к Н.К. Автоматизированная система планирования ремонтно-технического обслуживания электрических сетей . . . 35

А л е к с а н д р о в В.Н., С е н ч у к Н.К. Вопросы сбора информации о техническом состоянии воздушных линий электропередач . . . . . 39

Б е р н х а р д т У. Вероятностное определение и моделирование графиков нагрузок энергосистем и их применение . . . . . 43

С т у п а к И.А. Исследование и анализ технико-экономических показателей некоторых схем электроснабжения электроемких производств промышленных предприятий . . . . . 47

С е р в о т к а Я., К л ю й к о М.П., Ю р а с ю к В.Н. Минимизация расхода горючего за процесс поиска поврежденного участка в городских электрических сетях 6-20 кВ . . . . . 53

Степанчук К.Ф. Кумулятивная модель разрушения и условия ускорения испытаний образцов изоляции . . . . . 59

### Электрооборудование промышленных предприятий

Палагин В.А. Параметрический синтез схем преобразователей температуры на основе теплозависимых элементов (ТЗЭ) . . . . . 64

Черномашенцев В.Г., Пацкевич В.А. Электромагнитные процессы в стабилизированном инверторе . . . . . 70

Прокочник В.В., Селиверстов Г.И., Духович Г.Л. О корреляционной связи электрических показателей металлургических предприятий. . . . . 77

Гульков Г.И. Закон управления электроприводом шлифовального станка . . . . . 81

Балуева Г.И., Беляев В.П., Ильин О.П., Игнатович В.Б. Методика оценки экономической эффективности использования технической документации при эксплуатации импортного электрооборудования . . . . . 87

Бладыко В.М., Сончик Л.И. Аппроксимация семейства "средних" кривых намагничивания сердечника . . . . . 91

Корниенко П.М., Лившиц В.С., Силюк В.Ф., Климович В.М. Экспериментальное обследование электростатических напряжений в сборочных цехах электронных приборов. . . . . 94

Демиденко Л.И. Испытание и изготовление магнитной системы счетчика потерь . . . . . 97

Лapidус А.И. Схема индукционно-динамического торможения асинхронных двигателей с датчиком контроля скорости. . . . . 101

Анхимюк В.Л., Новицкая В.А., Раткевич Е.П. Динамические характеристики тиристорного электропривода в режиме прерывистых токов . . . . . 106

### Теплоэнергетика

Кнотько П.Н., Трутаев В.И., Турбан Т.М., Яковлев Б.В. Экономическая эффективность маневренных ТЭЦ . . . . . 113

Ш а т о н Л.В., Чернышев и ч В.И., Несенчук А.П. Исследование кинетики десорбции углекислоты из частиц цеолита СаА при импульсном тепловом воздействии . . . . .	118
Северянин В.С., Горбачева М.Г. Об эмиссии окислов азота при пульсирующем горении . . . . .	122
Маркевич М.А., Альшевский В.Н. Влияние озона на конверсию NO в NO <sub>2</sub> в дымовом факеле ТЭС . . . . .	127
Литвинец В.И., Рубахин В.Б., Михаленок С.А. Метод сопряжения контуров при синтезе многосвязных систем регулирования . . . . .	132
Заватко А.М., Тарасевич Л.И., Фатеев Г.А. Тепловой регенеративный цикл в системе четырех взаимодействующих потоков . . . . .	136

## НАУЧНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Выпуск 9

Зав. редакцией *А.Я.Канторович*

Редактор *Г.В.Вагабова*

Мл.редактор *Т.И.Досаева*

Худож.редактор *Ю.С.Сергачев*

Техн.редактор *Г.А.Лакишик*

Корректоры *Н.И.Бондаренко, З.Б.Звонарева*

График *Н.В.Журавлева*

Операторы *Е.Г.Полойко, И.С.Жукова*

ИБ № 1368

Подписано в печать 26.10.81. АТ 20642. Формат 60x90 1/16. Бумага офсет. Офсет. печать. Усл.-печ.л. 9,25. Усл.кр.-отт. 9,75. Уч.-издл. 8,05. Тираж 450 экз. Зак.5004. Цена 1 р. 30 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 621.31.003.1

**Прима В.М.** Производство и потребление электроэнергии отраслями народного хозяйства СССР. – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с.3–10.

Характеризуются перспективы развития электроэнергетики страны в XI пятилетке. Содержание материала статьи опирается на утвержденные XXVI съездом КПСС "Основные направления экономического и социального развития СССР на 1981–1985 годы и на период до 1990 года".

Приводится анализ темпов роста электропотребления различными отраслями народного хозяйства и связанных с этим вопросов выполнения систем электроснабжения. – Библиогр. 4.

УДК 621.316.14

**Федин В.Т., Лычев П.В.** Повышение пропускной способности и эффективности использования токопроводящих материалов криогенных электропередач. – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 11–16.

Предложена схема электропередачи для одновременной передачи переменного и постоянного тока. Произведена оценка экономической эффективности предложенной электропередачи по сравнению с электропередачей переменного тока. – Ил. 1. Табл. 2. Библиогр. 6.

УДК 621.316

**Короткевич М.А., Травянский М.И.** Применение метода множителей Лагранжа для определения рационального значения составляющих эксплуатационных расходов электрической сети. – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 16–21.

Показана возможность применения метода множителей Лагранжа для определения рационального значения составляющих эксплуатационных расходов электрической сети. – Библиогр. 2.

УДК 621.311.1

**Падалко Л.П., Нагорнов В.Н.** Проблемы рационального покрытия переменной части графика электрической нагрузки энергосистемы. – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 21–26.

Излагается методика формирования экономико-математических моделей оптимизации структуры генерирующих мощностей как в статической, так и динамической постановках. На основе решения моделей для ряда энергосистем ОЭС Северо-Запада показана экономическая целесообразность работы ТЭЦ с частичной разгрузкой во время ночного провала. – Библиогр. 2.

УДК 621.316.1.027.5.019.3

**Крысенко А.П.** Выбор объема, очередности и мест установки устройств противоаварийной автоматики в распределительных сетях. – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 26–30.

Предложена методика выбора объема, очередности и мест установки устройств противоаварийной автоматики в распределительных сетях. – Ил. 1. Библиогр. 3.

УДК 621.31.658.3

**Сущенко Л.Р. Принципы нормирования затрат на передачу и распределение электроэнергии.** – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 31–34.

Анализируются существующие методы нормирования затрат на передачу и распределение электрической энергии и даются предложения по их совершенствованию. В частности, предложены новые принципы нормирования амортизационных отчислений затрат на капитальный ремонт и определения плановых величин потерь энергии в сетях. – Библиогр. 2.

УДК 621.315.1:621.3.019.3

**Железняк А.И., Сенчук Н.К. Автоматизированная система планирования ремонтно-технического обслуживания электрических сетей.** – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 35–39.

Показана актуальность проблемы качественного планирования ремонтно-технического обслуживания в электрических сетях. Предложена методика автоматизированного расчета задач планирования с применением ЭВМ. Приведена укрупненная структурная схема решения комплекса задач планирования. – Ил. 1. Библиогр. 2.

УДК 621.315.1:621.3.019.3

**Александров В.Н., Сенчук Н.К. Вопросы сбора информации о техническом состоянии воздушных линий электропередач.** – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 39–43.

Определен состав задач справочно-информационной системы о надежности и техническом состоянии воздушных линий и рассмотрены возможные пути получения информации для их решения. Предложен формализованный документ для автоматизированного сбора информации о дефектах и контроле за их устранением. – Табл. 1. Библиогр. 2.

УДК 621.311.016.3.001.573:681.3

**Бернхардт У. Вероятностное определение и моделирование графиков нагрузок энергосистем и их применение.** – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 43–47.

Приведены результаты статистического анализа графиков электрических нагрузок, полученные при помощи ЭВМ. Представлена вероятностно-определенная трендовая модель процесса потребления мощности, реализованная для ЭВМ и ее применение для определения потерь электрической энергии. – Библиогр. 3.

УДК 621.315.21:537.312.62

**Ступак И.А. Исследование и анализ технико-экономических показателей некоторых схем электроснабжения электроемких производств промышленных предприятий.** – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 47–53.

Для крупных потребителей и электроемких производств промышленных предприятий сформированы различные модели сверхпроводящих схем электроснабжения постоянного напряжения до 1000 В и переменного до 35 кВ. Разработаны алгоритмы и составлена программа расчета технико-экономических показателей отдельных элементов и моделей на языке ФОРТРАН-IV, выполнены расчеты на ЭВМ ЕС-1020, выполнен анализ надежности методом алгебры логики, построены графики и проведено сравнение рассчитанных вариантов схем. – Ил. 2. Библиогр. 2.

УДК 621.316.1

**Сервотка Я., Ключко М.П., Юрасюк В.Н. Минимизация расхода горючего за процесс поиска поврежденного участка в городских электрических сетях 6–20 кВ.** – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982; вып. 9, с. 53–59.

Рассмотрена математическая модель процесса поиска повреждения методом пробных включений. Предложен критерий выбора стратегии с минимальной длиной пути проездов. – Библиогр. 1.

УДК 537.523.4.621.315.6

Степанчук К.Ф. Кумулятивная модель разрушения и условия ускорения испытаний образцов изоляции. – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 59–63.

Рассматриваются условия ускорения испытаний образцов органической изоляции и зависимость кратковременной прочности от времени предварительной выдержки при заданном напряжении. Получены соответствующие расчетные соотношения. – Ил. 1. Библиогр. 3.

УДК 621.316.825

Палагин В.А. Параметрический синтез схем преобразователей температуры на основе тепловязисимых элементов (ТЗЭ). – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 64–70.

Приведен метод расчета оптимальных параметров схем преобразователей температуры, обеспечивающих линейную зависимость тока в измерительной ветви от температуры. Расчет проводится в относительных единицах. Дан пример определения параметров мостовой измерительной схемы. – Ил. 1. Библиогр. 2.

УДК 621.314.632

Черномашенцев В.Г., Пацкевич В.А. Электромагнитные процессы в стабилизированном инверторе. – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 70–76.

Рассматривается работа инвертора со стабилизирующими диодами. Исследуются электромагнитные процессы. Отмечается, что при наличии стабилизирующих диодов максимальное напряжение на коммутирующем конденсаторе и тиристорах при любом сопротивлении нагрузки не превышает величины напряжения источника питания. Разработанный инвертор может использоваться в индукционных электротермических установках. – Ил. 3.

УДК 621.316.06:669.013.5

Прокопчик В.В., Селиверстов Г.И., Духович Г.Л. О корреляционной связи электрических показателей металлургических предприятий. – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 77–81.

Установлены корреляционные связи и найдены зависимости между электрическими показателями предприятий черной металлургии, на основе которых возможно прогнозирование структуры электрического хозяйства действующих и проектируемых предприятий. Приведены зависимости, подтверждающие низкую загрузку основного электрооборудования действующих предприятий отрасли. – Табл. 2. Библиогр. 3.

УДК 62-83:621.9

Гульков Г.И. Закон управления электроприводом шлифовального станка. – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 81–86.

Получен закон управления электроприводом шлифовального станка, использование которого позволяет уменьшить вибрации асинхронного двигателя шлифовального круга и станка в целом и повысить производительность шлифования. – Ил. 2. Библиогр. 3.

УДК 621.31:677.4.05 – 83.004.003.13

Методика оценки экономической эффективности использования технической документации при эксплуатации импортного электрооборудования / Г. И. Балужева, В. П. Беляев, О. П. Ильин, В. Б. Игнатович. – Научные и прикладные проблемы энергетики. 1982, вып. 9, с. 87–91.

Приводится методика определения экономического эффекта от использования в процессе эксплуатации рекомендаций научной обработки технической документации на новое импортное электрооборудование. Указываются составляющие социального эффекта. – Библиогр. 2.

УДК 621.372.501.14

Бладыко В. М., Сончик Л. И. Аппроксимация семейства "средних" кривых намагничивания сердечника. – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 91–94.

Разработан метод аппроксимации "средних" кривых намагничивания сердечника по вольтамперной характеристике катушки для действующих значений и вольтамперной характеристике по амплитудным значениям. Получена зависимость коэффициентов аппроксимирующего выражения от амплитуды магнитной индукции. – Ил. 2. Библиогр. 3.

УДК 621.319.7

Экспериментальное обследование электростатических напряжений в сборочных цехах электронных приборов / П. М. Корниенко, В. С. Лившиц, В. Ф. Силюк, В. М. Климович. – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 94–97.

Приведены сведения о воздействии статического электричества на полупроводниковые изделия и результаты измерений электростатических напряжений в цехах сборки электронных приборов. – Табл. 2. Библиогр. 1.

УДК 621.316.13

Демиденко Л. И. Испытание и изготовление магнитной системы счетчика потерь. – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 97–101.

Предлагается методика изготовления и испытания магнитной системы счетчика потерь электрической энергии на базе трехфазного счетчика активной энергии типа И-43. Погрешность счетчика потерь не превышает 2,5%. – Ил. 2. Библиогр. 2.

УДК 621.313.3.

Лапидус А. И. Схема индукционно-динамического торможения асинхронных двигателей с датчиком контроля скорости. – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 101–106.

Рассматривается схема интенсивного торможения асинхронных двигателей с датчиком контроля скорости, благодаря которому обеспечивается высокая степень точности останова. Схема может быть использована для быстрой и точной остановки электроприводов металлорежущих станков и других производственных механизмов. – Ил. 2. Библиогр. 5.

УДК 621.314.53

Анхимюк В. Л., Новицкая В. А., Раткевич Е. П. Динамические характеристики тиристорного электропривода в режиме прерывистых токов. – Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 106–112.

Рассматриваются динамические характеристики тиристорного электропривода в режиме прерывистых токов, рассчитанные по мгновенным значениям скорости и тока

двигателя при скачке угла открывания клапанов тиристорного преобразователя и при формировании пусковой диаграммы тока, соответствующей оптимальному по быстродействию переходному процессу. — Ил. 5. Библиогр. 2.

УДК 621.311.22:338

**Экономическая эффективность маневренных ТЭЦ/ П.Н.К н о т ь к о, В.И.Т р у т а е в, Т.М.Т у р б а н, Б.В.Я к о в л е в.** — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 113–118.

Рассматривается сравнительная экономическая эффективность перевода базовых КЭС и ТЭЦ в маневренный полупиковый режим при условии замещения их в базовой части графика электрических нагрузок АЭС и вытеснения из полупиковой части специальных маневренных конденсационных энергоблоков. Определены экономически предельные затраты в АЭС и ядерное горючее, при которых использование ТЭЦ в маневренном режиме нецелесообразно. — Ил. 3. Табл. 1. Библиогр. 2.

УДК 66.074.8

**Ш а т о н Л.В., Ч е р н ы ш е в и ч В.И., Н е с е н ч у к А.П.** Исследование кинетики десорбции углекислоты из частиц цеолита СаА при импульсном тепловом воздействии. — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 118–122.

Записана математическая модель процесса десорбции углекислоты из частиц цеолита СаА при их импульсном нагреве. Приведено описание экспериментальной установки для определения степени десорбции.

Результаты опытов обрабатывались в соответствии с приведенной моделью. Получено удовлетворительное согласование численного расчета и эксперимента.

Также выполнена оценка тепловой и диффузионной релаксации. Подтверждены данные по измерению коэффициента диффузии углекислоты в цеолите СаА, полученные авторами ранее. — Ил. 1. Табл. 1. Библиогр. 2.

УДК 662.76

**С е в е р я н и н В.С., Г о р б а ч е в а М.Г.** Об эмиссии окислов азота при пульсирующем горении. — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 122–127.

Показано, что при пульсирующем горении температура в зоне реакции ниже, чем в стационарном факеле; время пребывания реагентов и избыток воздуха близок к единице, парциальное давление  $O_2$  мало, что приводит к малому содержанию окислов азота в продуктах сгорания. — Ил. 3. Табл. 1. Библиогр. 5.

УДК 662.96:621.311.22.001

**М а р к е в и ч М.А., А л ь ш е в с к и й В.Н.** Влияние озона на конверсию  $NO$  в  $NO_2$  в дымовом факеле ТЭС. — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 127–132.

Рассматривается потенциальная возможность участия атмосферного озона в доокислении окиси азота в двуокись по длине дымового факела.

Приведены наиболее важные факторы, определяющие степень превращения окиси азота в двуокись посредством озона в ядре факела на различных расстояниях от дымовой трубы, и модель расчетной схемы. — Ил. 2. Библиогр. 8.

УДК 62-50 (0.75.8)

**Л и т в и н е ц В.И., Р у б а х и н В.Б., М и х а л е н о к С.А.** Метод сопряжения контуров при синтезе многосвязных систем регулирования. — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с. 132–136.

Приведен метод определения структуры взаимосвязанных контуров замкнутой системы по критерию оптимального модуля, на примере АСР мощности энергоблока дан в общем виде расчет параметров динамической настройки многосвязной системы. — Ил. 1. Библиогр. 4.

УДК 536.244/66.021.93/66.074.7

З а в а т к о А.М., Т а р а с е в и ч Л.И., Ф а т е е в Г.А. Тепловой регенеративный цикл в системе четырех взаимодействующих потоков. — Научные и прикладные проблемы энергетики, 1982, вып. 9, с.136—138.

Выполнен численный анализ эффективности тепловой рециркуляции в системе четырех взаимодействующих потоков. Показано, что поток тепла, циркулирующий в системе, в условиях, соответствующих регенерации адсорбционных слоев, может в несколько раз (до четырех) превосходить мощность нагревателя. — Ил. 1.