

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ БССР  
БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
РЕСПУБЛИКАНСКИЕ МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЕ СБОРНИКИ

# **научные и прикладные проблемы энергетики**

выпуск 5

МИНСК "ВЫШЭЙШАЯ ШКОЛА"  
1978

620.9  
Н34

Главный редактор  
кандидат технических наук Ю.А. Малевич

Редакционный совет:

В.С. Ермаков, И.Ф. Кудрявцев, А.М. Леонков, Л.В.  
Ничипорович, П.В. Ползик, Г.Е. Поспелов, Е.П. Рат-  
кевич, В.Ф. Степанчук, Г.Н. Хартанович, Г.П. Шейна,  
Б.В. Яковлев

Н 30300--062 75--78  
М304(05)--78

© Издательство "Высшая школа", 1978

## РЕШЕНИЯ XXV СЪЕЗДА КПСС В ЖИЗНЬ

УДК 621.039:621.311:697.3

Ю.А. Малевич, канд. техн. наук,  
А.А. Ганжин, канд. техн. наук,  
А.Р. Никонов, канд. техн. наук

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В БССР

Задачи развития народного хозяйства в X пятилетке, определенные XXV съездом КПСС, предусматривают значительный рост качественных показателей топливно-энергетического хозяйства. За последние годы существенно улучшилась структура топливно-энергетического баланса страны в результате увеличения в нем доли наиболее эффективных видов топлива (газа - 20,8%, нефти - 43,8%) и повышения степени электрификации. Дальнейший рост энергетического потенциала нашей страны должен осуществляться преимущественно на базе гидравлической и атомной энергии, дешевых углей, а прирост добычи нефти и природного газа все в большей мере будет направляться на технологические нужды. Анализ состояния использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в каждой отрасли народного хозяйства, в каждом экономическом районе является основной предпосылкой организации работ по повышению эффективности энергоиспользования.

В БССР опережающими темпами развиваются машиностроение и металлообработка, химическая и нефтехимическая промышленность, электроэнергетика, промышленность стройматериалов, пищевая и легкая промышленность.

В республике ограничены собственные качественные виды топлива, поэтому возрастает актуальность энергетической оценки каждого вида топлива, повышения эффективности использования ТЭР с учетом использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), повышения общего энергетического к.п.д. всех теплотехнических процессов в промышленности. В табл.1 показано использование ТЭР в 1975 г.

Доля отдельных видов топлива в общем потреблении составляет: мазут - 52%, газ - 16,9%, уголь - 9,6%, торф - 9,2%, дрова - 9,9%.

Таблица 1. Структура потребления энергоресурсов в БССР в 1975 г.

Отрасли	Электро- энергия	Тепловая энергия	Топливо
<b>Промышленность</b>			
машиностроение и металлообработка	12,8	9,1	1,6
энергетика	8,3	-	58,3
химическая и нефтехимическая	18,2	18,2	1,3
топливная	5,1	8,1	5,0
лесная и бумажная	2,9	6,9	0,1
строительные материалы	4,6	7,2	5,6
легкая и пищевая	7,8	7,2	1,1
прочие	2,3	3,7	0,6
<b>Итого . . .</b>	<b>62,2</b>	<b>66,7</b>	<b>73,6</b>
<b>Коммунально-бытовое потребление</b>			
Прочие отрасли	16,9	19,8	18,5
Потери	12,1	10,8	5,4
	8,8	2,7	2,5
<b>Итого . . .</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

В промышленности БССР непосредственное потребление топлива составляет 4,3 млн. т (в том числе в металлообрабатывающей, пищевой, легкой промышленности используется 1,7 млн. т газа и 0,6 млн. т мазута). Замена твердого топлива газом и мазутом позволила обеспечить значительную экономию ТЭР, а также в целом снизить общие затраты на топливоиспользование. В значительном количестве (до 2,0 млн. т в год) газ используется отопительными котельными. В промышленности газ применяется недостаточно эффективно; к.п.д. газопотребляющих установок близок к к.п.д. установок, в которых сжигается мазут и уголь. Количество рекуператоров и других утилизационных установок на промышленных предприятиях сокращается. В целом тепловой к.п.д. топливоиспользующих установок в промышленности БССР равен 15 - 27%. Повышение эффективности использования топлива может быть решено за счет:

а) передачи газа установкам (нагревательные печи, вагранки, высокотемпературные сушильные установки), где его при-



менение существенно повышает производительность труда и качество основной продукции;

б) перевода промышленных котельных, обжиговых и других установок на мазут, уголь, торфяные брикеты с применением таких прогрессивных методов, как горение в кипящем слое, пиролиз нефтепродуктов, обеспечивающих очистку уходящих газов от  $SO_2$  и  $NO$ , и уменьшение поверхностей нагрева.

При переводе промышленных установок на твердые виды топлива необходимо организовать комплексное энерготехнологическое применение ТЭР с утилизацией отходов и созданием замкнутых циклов, где будут использоваться зола, шлаки, продукты очистки газов и другие выбросы (например, схемы энергетического института им. Г.М. Кржижановского по сжиганию сланцев). Необходимо отметить, что подобных исследований в БССР проводится недостаточно, особенно в части использования таких местных потенциальных ресурсов, как сланцы и бурые угли.

В республике непрерывно увеличивается использование электроэнергии. Коэффициент электрификации - отношение расхода электроэнергии ко всему первичному топливу - 329 квт·ч/ту.т в 1960 г. увеличился в 1975 г. до 795 квт·ч/ту.т.

Если в 1970 г. на выработку электроэнергии затрачивалось 21,7% всего топлива, то в 1975 г. - уже 25,9%, а доля непосредственного использования топлива с 50,3% сократилась до 41,5% и продолжает неуклонно снижаться, отражая прогрессивную тенденцию непрерывного увеличения электроооруженности труда, все большего увеличения электрофицированных процессов и средств автоматизации.

Увеличивается доля топлива, используемого для получения тепловой энергии, - с 28% в 1970 г. до 35% в 1975 г., что свидетельствует о все большем применении в ряде теплотех-

Таблица 2. Уровень централизованного обеспечения отдельных отраслей промышленности БССР, %

Отрасли промышленности	Электроэнергия	Тепловая энергия	Топливо
Машиностроение	41,6	38,8	19,6
Нефтехимия	39,4	49,8	10,8
Стройматериалы	14,6	25,4	60,0
Легкая и пищевая	26,4	55,6	18,0

нических процессов пара и горячей воды (вместо непосредственного сжигания топлива). В ряде отраслей промышленности БССР доля электро- и тепловой энергии равна 70 - 80%, что говорит о достаточно высоком уровне централизованного энергообеспечения. В то же время этот уровень низок в промышленности стройматериалов и ряде других отраслей (табл. 2).

Показателем, характеризующим энергопотребление в промышленности, является коэффициент полезного использования энергоресурсов:

$$\eta_{и.т} = \eta_{д.т} \eta_{пр.э} \eta_{тр.э} \eta_{пр.м} \eta_{р.м}$$

где учитывается к.п.д. добычи, транспорта и переработки топлива; преобразования его в другой вид энергии; транспорта

Таблица 3. Средние показатели использования топлива и энергии

Отрасли	Электро-энергия	Тепловая энергия	Топливо
к.п.д. на стадии использования энергоресурса			
Промышленность	50	73	21
Коммунально-бытовой сектор	42	95	46
Сельское хозяйство	35	45	22
Строительство	40	-	30
Транспорт	70	-	30
Прочие	-	50	30

Таблица 4. Средние показатели использования энергетических ресурсов

Электроэнергия	Тепловая энергия	Топливо	Всего
Общий коэффициент по первичной энергии			
16,4	62	30	-
Структура потребления			
25	33	42	100
Структура отдельного ресурса в общем коэффициенте использования топлива			
4,1	20,5	12,4	37

энергии; привода рабочей машины; работы технологического агрегата. Наиболее важной составляющей является к.п.д. рабочих машин, однако исследование его значений недостаточно. Отсутствуют данные по большинству теплотехнических процессов о фактических значениях к.п.д. с учетом годового режима работы агрегатов, влияния климата и других местных условий (табл. 3, 4).

Расчеты по оценке использования топлива в отдельных отраслях народного хозяйства показывают, что имеются значительные резервы его повышения. В целом по республике использование энергоресурсов по первичному топливу составляет 37%, что соответствует среднему значению этого показателя по стране. Расчеты и практика работы показывают, что для высокотемпературных процессов (термическая обработка, плавка и др.) допустимо использование как электроэнергии, так и газа; для среднетемпературных – более эффективным является использование пара, а для низкотемпературных – использование горячей сетевой воды. С учетом роста дефицита (и стоимости) качественных видов топлива роль топливного фактора при выборе схем энергоснабжения непрерывно будет возрастать.

Одним из важнейших путей экономии ТЭР является использование вторичных энергетических ресурсов (ВЭР). На производство тепловой энергии затрачено 8,7 млн. ту. т и непосредственно использовано в промышленности 4,3 млн. ту. т (в том числе до 0,6 млн. ту. т в машиностроении, до 1,7 млн. ту. т в промышленности стройматериалов).

Однако использование топливных ВЭР сравнительно невелико и составляет до 0,1 млн. ту. т/г (в основном в виде отходов промышленности деревообработки и в нефтехимии). В 1975 г. в промышленности БССР теплоутилизационными установками произведено до 1,6 млн. Гкал тепловой энергии, что эквивалентно почти 250 т ту. т/г (в основном это утилизационные установки крупных объединений химии и нефти – Гродненское объединение "Азот", Полоцкий нефтеперегонный завод и др.). Экономия в целом за счет ВЭР составляет около 0,33 млн. ту. т/г. Теоретически возможное количество ВЭР оценивается в 3,5 млн. ту. т/г, а технически и экономически оправданное (для использования в настоящее время) – в 2,0 млн. ту. т/г, что в 5 – 7 раз больше фактических величин. Анализ использования ВЭР говорит о том, что в таких крупных по потреблению тепла и топлива отраслях, как машиностроение, производство стройматериалов и других, вторичные энергетические ресурсы практически не используются, что нельзя считать оправданным.

В республике практически (за исключением нескольких нагревательных печей МТЗ и МАЗ) отсутствуют утилизационные установки по применению уходящих газов нагревательных печей, сушильных и других теплотехнических установок, использующих газ как топливо. Трудности несомненны: промышленность не выпускает малогабаритных котлов-утилизаторов, отсутствуют высокотемпературные нагревательные блоки и другое оборудование. Однако высокая окупаемость схем использования высокотемпературных ВЭР позволяет готовить такого рода установки собственными силами. Можно отметить роль СКБ-3 (Минавтопром, г. Минск), которое разработало ряд новых конструкций рекуператоров, успешно внедрило их в производство, осуществляет опытную эксплуатацию действующих установок (нагревательные печи в кузнечном цехе МАЗа). Видимо, на ближайшие 5 - 10 лет необходимо взять за основу установки, обеспечивающие одноступенчатый подогрев воздуха до 300 - 350°С и охлаждение газов - до 700 - 800°С. Дальнейшее охлаждение газов до 400 - 500°С необходимо осуществить в теплоутилизационных установках путем подогрева воды для бытовых и технологических нужд. Такие установки предложены кафедрами Белорусского политехнического института, Минским автозаводом, Минским заводом шестерен и другими крупными предприятиями. Тепловые ВЭР в виде пролетного пара вскипания могут быть полностью использованы в схемах теплоснабжения путем установки контактных охладителей пара, смешивающих подогреватели воды и др. Тепловые ВЭР в виде тепла отработавшего пара молотов (и других силовых установок) успешно используются на минских заводах - автомобильном, тракторном, шестерен. Наиболее эффективна схема на Минском заводе шестерен, где тепло ВЭР практически полностью обеспечивает собственные потребности в горячей воде, предназначенной для отопления, вентиляции и горячего водоснабжения, а его избытки передаются в энергосистему с обратной сетевой водой.

Следует отметить, что такие низкотемпературные тепловые ресурсы, как подогретая вода систем охлаждения установок, тепло шлаков, тепло закалочных ванн и многие другие практически не используются. Специалистами БПИ и Белорусского филиала энергетического института им. Г.М. Кржижановского предложена схема теплофикационного использования низкопотенциальных тепловых ВЭР предприятий, которая предусматривает организацию этого процесса путем утилизации ВЭР сетевой

водой (ТЭЦ и котельных) и передачи избытков тепла в сети энергосистемы. Это позволит использовать существующие сети и системы теплофикации для сбора и утилизации ВЭР, которые не могут быть применены на отдельных предприятиях в ближайшие годы.

Исследования, проведенные кафедрами "Промышленная теплоэнергетика", "Организация и экономика промышленности" БПИ на базе творческих научно-производственных объединений "МАЗ-БПИ" и "МТЗ-БПИ", позволили выдвинуть ряд комплексных предложений, направленных на повышение эффективности использования ТЭР на крупных машиностроительных предприятиях. Основное содержание предложений – комплексный энерготехнологический подход к организации теплотехнологических процессов. Эта работа должна базироваться на детальном обследовании использования ТЭР на предприятиях.

Выполнение данных комплексных задач требует разработки единой методики анализа и исследований, привлечения к этой работе широкого круга специалистов в области энергетики.

Возрастает актуальность использования студентов-энергетиков старших курсов для оценки эффективности использования ТЭР при прохождении производственных практик, выполнении курсовых и дипломных работ. Привлечение к работе большой группы студентов несомненно позволит вскрыть дополнительные резервы экономии топлива и энергии, внедрить новые идеи и разработки в производство.

Резюме. Доля потребления в БССР нефти и газа (68,9%), а также степень централизованного использования электрической и тепловой энергии выше средних по стране величин. Однако фактические значения показателей использования энергоресурсов позволяют считать, что имеются значительные резервы экономии.

## ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 620.9:621.039:621.311.22:697.3.003 (045)

И.П. Шпорта, П.Н. Кнотько,  
Б.В. Яковлев (канд. техн. наук),  
В.И. Трутаев

### РОЛЬ БЕЛОРУССКОГО ОТДЕЛЕНИЯ ВНИПИЭНЕРГОПРОМА В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Развитие производительных сил на современном этапе сопровождается интенсивным ростом потребления энергетических ресурсов (ЭР). Только за годы девятой пятилетки общее их потребление в нашей стране возросло более чем в 1,3 раза и достигло 1,7 млрд. ту. т, а к концу текущего столетия возрастет до 5,6 млрд. ту. т, или до 17 ту. т в год в расчете на одного жителя.

Значительная роль в решении вопросов экономии ЭР принадлежит проектным, конструкторским и научно-исследовательским организациям. 25 лет Белорусское отделение ВНИПИЭнергопром проектирует теплоисточники и системы теплоснабжения городов и промышленных центров. За этот период по проектам отделения построено 25 новых ТЭЦ, расширено и реконструировано 40 электростанций, введено в эксплуатацию более 300 км магистральных тепловых сетей. Общая мощность построенных и строящихся по проектам отделения ТЭЦ в республике составляет около 3 млн. кВт, или 40% общей мощности энергосистемы. Прогрессивные решения особенно в теплофикации и централизации теплоснабжения городов республики позволили Белорусской энергосистеме стать одной из самых экономичных и передовых энергосистем страны, о чем свидетельствуют показатели удельных расходов условного топлива на отпущенную электрическую и тепловую энергию. В 1976 г. эти показатели составили 310,4 г/кВт·ч и 170, 31 кГ/Гкал, что ниже средних по Минэнерго СССР.

В проектах отделения предусматривались наиболее прогрессивные технические решения. Например, на Минской ТЭЦ-3 был введен в эксплуатацию первый в стране теплофикационный турбоагрегат Т-100-130, на Мозырской ТЭЦ - один из головных турбоагрегатов ПТ-135-130, на Бобруйской ТЭЦ-2 - головной

газоплотный котлоагрегат БКЗ-420-140. Широкое применение получил разработанный (с участием отделения) проект серийной газомазутной ТЭЦ заводского изготовления (ТЭЦ-ЗИГМ), что позволило на 10-12% снизить капитальные вложения, сократить трудозатраты и сроки строительства. По этому проекту строится крупнейшая в республике Минская ТЭЦ-4 мощностью 900 МВт. В настоящее время отделение располагает высококвалифицированными кадрами инженеров-проектировщиков. Ему поручается проектирование ряда зарубежных энергетических объектов в Югославии, Нигерии, Ливии, разработка схем теплоснабжения городов на базе атомных источников тепла, включая такие города, как Москва и Одесса.

С 1973 г. на базе ранее существующего института "Промэнергопроект" образовано Белорусское отделение Всесоюзного Государственного научно-исследовательского и проектно-конструкторского института энергетики промышленности (ВНИПИэнергопром), который является головной организацией по проведению научных исследований и проектно-конструкторских разработок в области использования топливно-энергетических ресурсов в промышленности и систем централизованного теплоснабжения, в том числе с атомными источниками.

В Белорусском отделении ВНИПИэнергопрома организованы два научных подразделения - отдел промышленной энергетики и лаборатория централизованного теплоснабжения. В соответствии с координационным планом научно-исследовательских работ, утвержденным Государственным комитетом науки и техники (ГКНТ) при Совете Министров СССР, в отделении исследуются вопросы рационального использования энергоресурсов в химической и автомобильной отраслях промышленности, ведутся работы по совершенствованию и повышению надежности систем централизованного теплоснабжения, исследуются оптимальные профили атомных теплоснабжающих установок, проводятся технико-экономические исследования развития топливно-энергетического комплекса с учетом ядерной энергетики и экологических факторов. Отделением выполнен ряд работ, обеспечивающих значительную экономию энергоресурсов в народном хозяйстве. Отдел промышленной энергетики совместно с Минским отделением НИИТЭХИМ разработал технико-экономический доклад о важнейших направлениях научно-технического прогресса в промышленной энергетике и эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в промышленности, который направлен в Минэнерго СССР и Госплан СССР.

Совместно с Госэнергонадзором проведено обследование состояния энергоиспользования наиболее энергоемких предприятий: Гродненского ПО "Азот", Полоцкого ПО "Полимир", Солигорского ПО "Белорускалий", Славянского ПО "Химпром", а также Минского и Волжского автомобильных заводов. Выявлены значительные резервы экономии энергоресурсов, например, на Гродненском ПО "Азот" – до 28 тыс. т. у. т, на Минском автозаводе – 23 тыс. Гкал тепла и 5,4 млн. кВт ч электроэнергии, на Полоцком ПО "Полимир" – 200 тыс. Гкал тепла.

Основными направлениями научно-экспериментальных работ в области промышленной энергетики являются исследования по рациональному использованию энергоресурсов, разработке и внедрению энерготехнологических и комплексных процессов, внедрению достижений технического прогресса в области утилизации вторичных энергетических ресурсов. Эти задачи могут быть успешно решены только в тесном контакте с промышленными предприятиями. Примером служат проводимые совместно с ПО "Белорускалий" экспериментальные исследования по повышению эффективности энергоиспользования в сушильных установках и работы по совершенствованию процессов грануляции и очистки минеральных удобрений на Гродненском ПО "Азот".

Отделением предложено применить в городах трехцелевую атомную водотеплоэлектроцентраль (АВТЭЦ), позволяющую наряду с производством электрической и тепловой энергии получать качественный дистиллят за счет термической дистилляции городских сточных вод. Основные преимущества АВТЭЦ заключаются в комплексном решении экологических проблем и вопросов энерго- и водоснабжения крупных городов.

Выполненные в отделении исследовательские и проектные разработки АВТЭЦ приняты в схемах теплоснабжения ряда городов страны.

Лаборатория централизованного теплоснабжения активно занимается исследованиями в направлении поиска оптимального профиля мощности атомных теплоисточников, выбора оптимальных атомных энергоустановок в регионе, совершенствования тепло-снабжающих систем с атомными теплоисточниками. Первые этапы исследований показали, что наиболее рациональным типом реактора для атомных котельных на современном этапе является водоводяной энергетический реактор с естественной циркуляцией, а экономически оправданная единичная мощность атомной котельной находится в пределах от 300 до 1500 Гкал/ч в зависимости от местных условий и стоимости органического топлива.



Значительную экономию органического топлива можно получить также за счет дальнейшего совершенствования систем централизованного теплоснабжения городов и промышленных центров. Развернуты работы по совершенствованию таких систем и повышению их надежности. Проведен анализ целесообразности применения однотрубного транспорта тепла, исследована совместная работа различных теплоисточников на общие тепловые сети, определены оптимальные радиусы действия ТЭЦ и ГРЭС при однотрубном и двухтрубном транспорте тепла, оптимальные мощности пиковых котельных, разработаны схемы включения аккумулялирующих емкостей в системах теплоснабжения.

В стадии разработки находятся важные для данного момента вопросы повышения надежности крупных теплоснабжающих систем. Анализ собранных данных повреждаемости тепловых сетей г. Минска позволил выявить определенные закономерности повреждений и сделать ряд практических рекомендаций по повышению надежности и снижению капитальных затрат. В частности, исходя из сроков службы теплопроводов и их повреждаемости, предложено пересмотреть существующую тенденцию применения труб большого диаметра (более 1 м). Указанные рекомендации были учтены при оценке надежности вариантов схемы теплоснабжения г. Минска (в перспективе до 1990 г.).

Значительное внимание уделяется также решению острых экологических проблем, связанных с развитием энергетики. В проектной практике широко применяются технические решения, обеспечивающие снижение выбросов и концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, очистку загрязненных сточных вод и сокращение шума от работающего оборудования. Комплексно эти решения учитываются в ведущейся в настоящее время разработке так называемой "бессточной" ТЭЦ, базирующейся на принципах безотходной технологии. Проектирование систем централизованного теплоснабжения с участием научных подразделений позволяет решать экологические проблемы в комплексе. Например, при разработке схемы теплоснабжения г. Минска с экологических позиций рассмотрена структура перспективного топливного баланса теплоисточников, определены необходимые уровни потребления газа в периоды максимальных нагрузок и неблагоприятных погодных условий, рационально распределены тепловые нагрузки между энергетическими установками. Внедрение этих мероприятий поможет значительно улучшить санитарное состояние в городе при умеренных затратах на их осуществление.

Совместно с Белфилиалом ЭНИН им. Г.М. Кржижановского выполнена работа по оценке экономической эффективности возможных мероприятий по охране окружающей среды в г.Минске от загрязнений выбросами теплоэнергетических установок. В ней показано, что к концу текущей пятилетки экономический ущерб от этих загрязнений, определенный по действующей методике, составит более 10 млн.руб. в год. При осуществлении всего комплекса возможных мероприятий общий выброс указанных загрязнений может быть снижен примерно в четыре раза. При этом уменьшение выбросов окислов азота достигается наладкой и совершенствованием процесса сжигания топлива, что требует сравнительно небольших затрат. Подавление же окислов серы требует сложных и дорогостоящих систем очистки топлива и продуктов сгорания.

В Белорусском отделении ВНИПИэнергопром установились деловые и творческие связи со многими академическими, отраслевыми и учебными институтами. Эффективной формой связи с предприятиями и организациями явилось заключение договоров о творческом содружестве. В настоящее время такие договора заключены с Белорусским политехническим институтом, ИТМО им. А.В. Лыкова, Одесским институтом "Укрюжгпромкоммунстрой", Гродненским ПО "Азот", Гомельским химкомбинатом.

Большие и сложные задачи стоят перед отделением в X пятилетке. В значительной мере они связаны с принятым на XXV съезде партии курсом на перестройку структуры топливного баланса страны в направлении резкого увеличения потребления твердых видов топлива и опережающее развитие ядерной энергетики. В связи с этим отделение приступило к разработке нового типового проекта крупной серийной ТЭЦ заводского изготовления на твердом топливе (ТЭЦ-ЗИТТ) с решением вопросов проектирования и выбора высоты дымовых труб, систем серочистки и золоулавливания.

В работах по атомной тематике основное внимание будет уделено определению оптимального профиля атомных теплоисточников с учетом энергоэкономических и режимных характеристик атомного энергооборудования и конкретных условий его эксплуатации в теплоснабжающих системах. Будут также продолжены работы по повышению эффективности теплоснабжающих систем за счет реконструкции турбин топливных КЭС с переводом их в теплофикационный режим в сочетании с дальним теплоснабжением. Дальнейшее развитие получают исследования по выявлению маневренных возможностей ТЭЦ и их участия в покрытии переменной части графика электрических нагрузок энергосистемы.

Резюме. Излагаются основные направления и результаты проектных и научно-исследовательских работ в Белорусском отделе ВНИПИэнергопром, показана роль отделения в повышении эффективности теплофикации и развитии исследований по актуальным проблемам энергетики.

УДК 621.165.003.13

А.Д. Качан, канд. техн. наук,  
А.М. Леонков, канд. техн. наук, П.Н. Шиша

### К ВОПРОСУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК НА ТЭЦ

Распределение тепловых нагрузок между турбинами не должно проводиться только по принципу получения максимальной выработки электроэнергии на тепловом потреблении, так как может оказаться, что достигнутое в результате распределение конденсационной выработки не является оптимальным. Увеличение доли конденсационной выработки на малоэкономичных агрегатах может привести к возрастанию суммарного расхода топлива (тепла).

Наивыгоднейший режим работы ТЭЦ определяется условием получения минимального расхода топлива в энергосистеме или минимальной величины расхода тепла на турбоустановки. Такой режим может достигаться путем перехода от допустимого варианта распределения нагрузок к оптимальному в следующей последовательности:

1) распределяются электрические нагрузки в предположении, что тепловые покрываются редуцированным паром (допустимый вариант);

2) производится оптимизация режимов работы ТЭЦ путем передачи тепловых нагрузок на турбины в порядке уменьшения коэффициентов отбора

$$K = 1 - W (q_K - q_T), \quad (1)$$

где  $W$  – удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении;  $q_K$ ,  $q_T$  – удельный расход тепла на выработку электроэнергии по конденсационному и теплофикационному циклам.

Очевидно, в итоге будет достигаться минимальный расход тепла (топлива) в комбинированной схеме энергоснабжения по сравнению с раздельной, т.е. наиболее экономичный вариант работы ТЭЦ.

При распределении конденсационных нагрузок необходимо учитывать, что реальные расходные характеристики теплофикационных турбин в конденсационном режиме зависят от особенностей парораспределения в части высокого давления (ЧВД) турбины, давления пара в нижнем регулируемом отборе (степени дросселирования пара в поворотной диафрагме), характеристики части низкого давления (ЧНД) и расхода пара в конденсатор. При этом вся характеристика или отдельные ее участки могут оказаться выпуклыми. В этом случае характеристики относительных приростов (ХОП) являются падающими, и распределение нагрузок из условия их равенства недопустимо, так как приведет к максимуму суммарного расхода тепла на турбоустановки, т.е. к наименее экономичному режиму работы ТЭЦ.

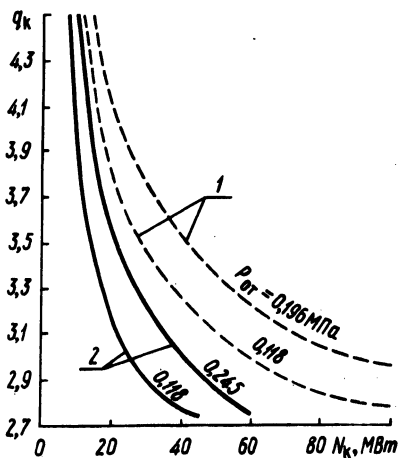


Рис. 1. Экономичность конденсационной выработки электроэнергии при заданном давлении пара в нижнем регулируемом отборе и тепловой нагрузке турбины, равной нулю: 1 - турбины Т-100 = -130; 2 - турбины ПТ-60-130/13.

Необходимо учитывать также существенное снижение экономичности конденсационной выработки при малых расходах пара в конденсатор, что связано с резким снижением к.п.д. ЧНД и даже потреблением мощности в последних ступенях [1]. Расчеты показывают, что в зависимости от давления в нижнем регулируемом отборе и величины конденсационной нагрузки удельный расход тепла на конденсационном потоке пара меняется очень сильно (на 30% и более, рис. 1).

Оптимальный вариант распределения конденсационных нагрузок турбин при любом виде расходных характеристик, в том

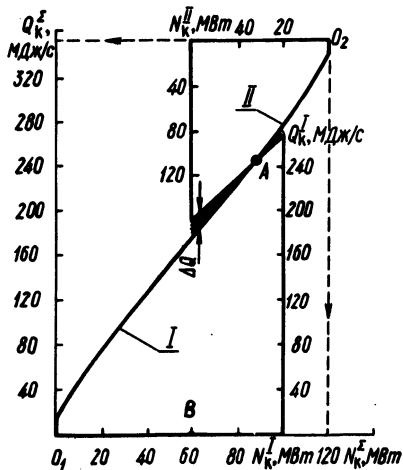


Рис. 2. Схема распределения конденсационных нагрузок турбин методом "совмещения характеристик".

числе и при падающих ХОП, может определяться графическим способом, используя "метод совмещения" характеристик [2].

Сущность этого метода для случая падающих ХОП показана на рис. 2. Здесь I – расходная характеристика первой турбины в конденсационном режиме; II – второй. Точка А касания совмещаемых характеристик соответствует равенству относительных приростов (касательные к характеристикам в этой точке совпадают) и отвечает максимальному суммарному расходу тепла. Оптимальное распределение нагрузок будет соответствовать точке с максимальной величиной  $\Delta Q$  (ординаты заштрихованной между совмещаемыми характеристиками области). На рис. 2 такой точкой является точка В. Данный способ распределения конденсационных нагрузок отличается наглядностью, так как величина  $\Delta Q$  одновременно определяет абсолютную экономию тепла за счет оптимизации режима работы турбин.

"Совмещение характеристик" необходимо производить так, чтобы абсцисса точки  $O_2$  (рис. 2) соответствовала суммарной мощности двух турбин.

Указанным способом, совмещая расходные характеристики турбин при заданном значении давления в нижнем теплофикационном отборе, который определяется режимом работы теплового потребителя, можно заранее установить оптимальное соотношение между нагрузками отдельных турбин. В частности, в случае однотипных турбин с одинаковыми характеристиками и падающими ХОП оптимальными будут являться режимы с максимальным значением разности конденсационных нагрузок турбин. Рис. 2 построен применительно к реальным характеристикам турбин Т-100-130 и ПТ-60-130/13. Как видно, при суммарной мощности 120 МВт оптимальный режим будет отвечать максимальной нагрузке турбины ПТ-60-130 – 60 МВт и нагрузке турбины Т-100-130 – 60 МВт.

При распределении тепловых нагрузок между турбинами условие (1) должно проверяться при дискретном (с определенным шагом) изменении тепловой нагрузки и заданной суммарной электрической мощности. Значения  $W$  и  $q_k$  должны подставляться с учетом реальной экономичности проточной части. Это легко выполнимо, так как на каждом шаге изменение тепловой нагрузки режим работы турбины (по расходу пара через ЧВД, ЧСД и ЧНД турбины) будет вполне определенным.

Величины  $W$  и  $q_k$  удобно определять, исходя из расчетного режима работы ЧВД и ЧНД турбины с последующим введением поправок на величину дополнительных против расчетного режима потерь тепла в этих отсеках [3].

Предлагаемый метод распределения нагрузок на ТЭЦ обладает известными преимуществами против известных методов. Он применим при любом виде расходных характеристик турбин, в то время как наиболее распространенный в настоящее время метод относительных приростов может применяться только для случая возрастающих ХОП. При применении достаточно перспективного метода динамического программирования (упорядоченного перебора вариантов) предлагаемый метод, основанный на переходе от допустимого варианта распределения нагрузок к оптимальному, снижает размерность задачи и упрощает ее решение.

С учетом получения аналитических зависимостей  $W$  на переменных режимах работы теплофикационных турбин (такая работа нами проводится) данный метод распределения нагрузок легко реализовать с помощью ЭВМ, что позволяет использовать его в АСУ ТЭЦ.

Резюме. Оптимальный режим работы турбин ТЭЦ может быть установлен путем последовательного распределения электрических и тепловых нагрузок исходя из условия обеспечения минимального расхода тепла (топлива) на ТЭЦ. При этом для распределения конденсационных нагрузок удобно пользоваться методом "совмещения характеристик".

#### Л и т е р а т у р а

1. Волков Н.П., Леонков А.М., Качан А.Д. и др. Исследование работы турбинных отсеков на переменных режимах. - "Изв. вузов СССР. Энергетика", 1969, № 7. 2. Сейфулла Д.О. К методу наиболее выгодного распределения нагрузки между двумя агрегатами (совмещение энергетических характеристик). - "Электрические станции", 1955, № 6. 3. Качан А.Д., Леонков А.М., Муковозчик Н.В. Расчет уточненных энергетических характеристик теплофикационных турбин. - В сб.: Эксплуатация тепломеханического оборудования в энергосистеме БССР. Минск, 1973.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ  
ТУРБИН НА КОНЕЧНУЮ ВЛАЖНОСТЬ ПАРА

Анализ причин повреждаемости котельных агрегатов привел к тому, что в 1972 г. на электростанциях было принято решение о снижении начальной температуры пара с  $570^{\circ}\text{C}$  до  $545^{\circ}\text{C}$  на КЭС и  $555-550^{\circ}\text{C}$  на ТЭЦ. Это мероприятие дало повышение надежности котельных агрегатов, но повлияло в свою очередь на экономичность работы турбоустановок и привело к увеличению конечной влажности пара.

Увеличение конечной влажности пара снижает не только к.п.д. части низкого давления (ЧНД) турбин, но и приводит к снижению надежности последних ступеней из-за эрозийного износа рабочих лопаток. Однако требуемое заводами-изготовителями ухудшение вакуума при снижении начальной температуры пара не всегда является необходимым и оправданным. Это объясняется тем, что работа теплофикационных турбин, особенно в течение отопительного периода, характеризуется значительным снижением расхода пара в конденсатор против расчетного значения, что приводит к "подсушиванию" пара из-за возникновения потерь на дросселирование в поворотной диафрагме ЧНД и снижения к.п.д. этого отсека. Поэтому конечная влажность пара остается на допустимом уровне даже при значительном снижении начальной температуры пара.

Таким образом, задача определения возможности работы теплофикационных турбин со сниженной начальной температурой пара без ухудшения вакуума сводится к расчету процесса расширения пара в турбине на заданном режиме ее работы и сравнения полученной при этом величины конечной влажности пара с максимальной величиной конечной влажности пара, рекомендуемой заводом-изготовителем.

На кафедре ТЭС БПИ выполнены исследования по выявлению режимов допустимой работы последних ступеней из условия конечной влажности пара при уменьшении начальной температуры пара. Расчеты проведены с использованием опытных данных кафедры ТЭС БПИ и ОРГРЭС по экономичности ЧНД турбин Т-100-130 и ПТ-60-130/13.

При определении конечной влажности пара для учета ряда факторов, а именно: расхода пара в конденсатор, давления отрабо-

тавшего пара, давления в отопительном отборе турбины, экономичности части высокого давления (ЧВД) и части среднего давления (ЧСД) турбин, начальных параметров пара потребовалось рассчитать большое количество режимов работы турбин. На основе расчетов были построены номограммы, которые позволяют быстро, не прибегая к расчетам, оценить конечную влажность пара при заданном режиме работы турбины. Соответствующая номограмма (для турбины ПТ-60-130/13) приведена на рис. 1.

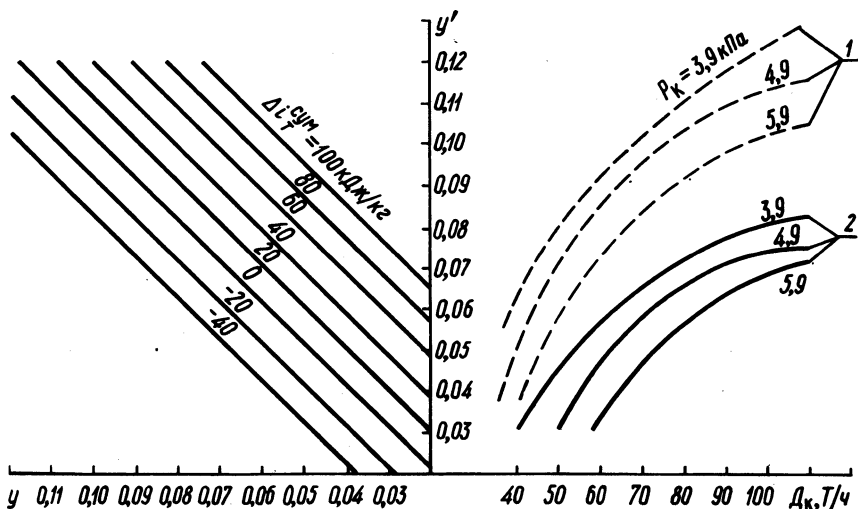


Рис. 1. Номограмма для определения конечной влажности пара турбины ПТ-60-130/13: 1 -  $P_{отб} = 0,098$  МПа; 2 -  $P_{отб} = 0,245$  МПа.

В ее правом квадранте отображается зависимость конечной влажности  $y'$  от давления пара в отопительном отборе (перед ЧНД) и расхода пара в конденсатор, которая построена в предположении расчетного режима работы ЧВД и ЧСД турбины при номинальной начальной температуре пара, равной  $565^{\circ}\text{C}$ . С помощью левого квадранта уточняется значение конечной влажности пара с учетом реальной экономичности проточной части турбин на данном режиме работы и заданной величины начальной температуры пара. Величина  $\Delta i_{\text{Т}}^{\text{сум}}$  представляет собой суммарное изменение энтальпии в нижнем отопительном отборе по сравнению с расчетным значением как за счет ухудшения к.п.д. ЧВД и ЧСД турбин на переменных режимах против расчетного, так и за счет уменьшения энтальпии в отборе при снижении начальной температуры пара, т.е.



$$\Delta i_{\text{т}}^{\text{сум}} = \sum \Delta Q_i - \Delta i_{\text{отб}} \quad (1)$$

Тогда действительная конечная влажность

$$y = y' - \frac{\Delta i_{\text{т}}^{\text{сум}}}{r} \quad (2)$$

где  $\Delta i_{\text{отб}}$  – величина снижения энтальпии пара в нижнем отопительном отборе при изменении начальной температуры пара;  $\sum \Delta Q_i$  – сумма дополнительных (по сравнению с расчетным режимом) потерь тепла в отсеках ЧВД и ЧСД турбин;  $r$  – скрытая теплота парообразования при давлении в конденсаторе  $P_{\text{к}}$ .

Величины  $\Delta i_{\text{отб}}$  и  $\sum \Delta Q_i$  рассчитывались по методике, предложенной кафедрой ТЭС БПИ [1] и находятся по промежуточным номограммам.

Использование номограмм удобно также для детального расчета технико-экономических характеристик турбоустановок при различных конденсационных нагрузках.

Анализ расчетов показывает, что в течение всего отопительного периода, когда конденсационная нагрузка не превышает 60–70% расчетной, с учетом реальной экономичности проточной части, допустима работа турбин ПТ-60-130/13 и Т-100-130 при  $t_0 = 555^{\circ}\text{C}$  с давлением в конденсаторе 3,9 кПа, т.е. без ухудшения вакуума. В летний период турбина ПТ-60-130/13 может также работать без ухудшения вакуума, если нагрузка производственного отбора будет находиться на уровне номинальной. Для турбины Т-100-130 при работе в летний период потребуется ухудшение вакуума до 5,9 – 6,9 кПа. Это снизит ее экономичность на 1,5%. Но ухудшения вакуума можно избежать, если применить для регулирования мощности турбины Т-100-130 скользящее начальное давление пара.

Резюме. Ухудшение вакуума при снижении начальной температуры пара до  $555^{\circ}\text{C}$  для турбин ПТ-60-130/13 и Т-100-130 не является необходимым практически на всех режимах работы ввиду эффекта "подсушивания" пара в ЧНД при снижении расхода пара в конденсатор против расчетной величины.

### Л и т е р а т у р а

1. Качан А.Д., Леонков А.М., Муковозчик Н.В. Расчет уточненных энергетических характеристик теплофикационных турбин. – В сб.: Эксплуатация тепломеханического оборудования в энергосистеме БССР. Минск, 1973.

В.И. Щербич, канд. техн. наук, Л.А.Баубель

О РАСЧЕТЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ  
ТУРБОАГРЕГАТОВ В АСУТП

В системах автоматизированного анализа тепловой экономичности турбоагрегатов определяются показатели изменения экономичности (поправки к расходу тепла, изменения электрической мощности), характеризующие перерасход первичной энергии вследствие отклонения от нормы анализируемых факторов.

Значительная часть показателей изменения экономичности рассчитывается по факторам, характеризующим изменения в системе регенерации турбоагрегата. При их расчете широко применяются методы, при которых в тепловой схеме выделяются звенья, испытывающие влияние первичного изменения. В этом случае не требуется пересчитывать всю тепловую схему, а достаточно рассчитать только вторичные изменения. Одним из таких методов является известный метод коэффициентов ценности тепла отбора  $\xi_j$  [1].

При решении практических задач, как правило, используются значения  $\xi_j$  как функции электрической мощности турбоагрегата, полученные при расчетных начальных параметрах пара, к.п.д. проточной части и давления пара в конденсаторе.

В практике эксплуатации указанные параметры, особенно давление пара в конденсаторе, существенно изменяются. Требуется исследовать зависимость коэффициентов ценности тепла отборов от изменений названных параметров и установить необходимость их учета при определении поправок к расходу тепла по регенеративным изменениям тепловой схемы. В данной работе изложены результаты такого исследования.

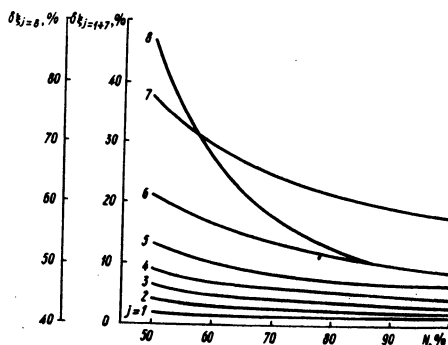
При отклонении параметров пара от расчетных значений коэффициенты ценности тепла отборов изменяются, что объясняется изменением значений энтальпий пара в начальных, конечных точках процесса расширения и в точках отбора пара на регенеративный подогрев. Для определения изменений коэффициентов  $\xi_j$  приняты следующие отклонения параметров пара и к.п.д. проточной части от расчетных значений: температуры свежего пара и пара после промперегрева  $\Delta t_o = \Delta t_{пп} = 10^\circ \text{C}$ ; к.п.д. проточной части ЧВД, ЧСД и ЧНД  $\Delta \eta_o = \Delta \eta_c = \Delta \eta_n = 2\%$ ; давления свежего пара  $\Delta P_o = 0,98 \text{ МПа}$ ; потери давления в тракте промперегрева  $\Delta \delta P_{пп} = 10\%$ ; давления пара в конденсаторе  $\Delta P_k = 4,9 \text{ КПа}$ .

Изменения энтальпий пара определялись при отклонении от расчетного значения каждого из указанных параметров в отдельности. Соответствующие этим отклонениям параметров изменения коэффициентов ценности тепла  $\delta \xi_{ji}$  определялись с использованием формул, приведенных в работе [2], по соотношению

$$\delta \xi_{ji} = \frac{\xi_{jp} - \xi_{ji}}{\xi_{jp}} \cdot 100\%,$$

где  $\xi_{jp}$ ,  $\xi_{ji}$  - коэффициенты ценности тепла  $j$ -го отбора соответственно при расчетных значениях параметров и при отклонении от расчетного значения  $i$ -го параметра.

Рис. 1. Изменение коэффициентов ценности тепла турбоагрегата К-300-240 при изменении давления пара в конденсаторе на 4,9 кПа.



Расчеты, произведенные для турбоагрегата К-300-240 ЛМЗ показали, что наибольшие изменения коэффициенты  $\xi_j$  претерпевают при отклонении от расчетного значения давления пара в конденсаторе, причем со снижением нагрузки турбины влияние отклонений увеличивается (рис. 1).

Изменения коэффициентов  $\xi_j$  при отклонении от расчетных значений каждого из остальных рассматриваемых параметров значительно меньше и составляет не более 1,5%.

Для определения необходимости учета рассматриваемых отклонений параметров пара от расчетных значений произведена оценка погрешности поправок к расходу тепла по регенеративным изменениям тепловой схемы (техническое состояние регенеративных подогревателей, их отключение, направление слива дренажей и пр.)

$$\delta \Delta Q_1 = \frac{\sigma \Delta Q_L}{\Delta Q_1} \cdot 100\%,$$

где  $\sigma \Delta Q_1$  - абсолютная погрешность 1-й поправки, возникающая при неучете отклонений от расчетных значений рассматри-

ваемых параметров;  $\Delta Q_1$  - абсолютное значение 1-ой поправки.

Погрешности поправок  $\sigma \Delta Q_1$  определены по формулам расчета среднеквадратических погрешностей сложных функций

$$\sigma \Delta Q_1 = \sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (K_{ji} \epsilon_j \delta \epsilon_{ji})^2},$$

где  $K_{ji} = \left| \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial \epsilon_{ji}} \right|$  - коэффициенты влияния.

Как видно из табл. 1, погрешности  $\delta \Delta Q_1$  обуславливаются влиянием давления  $P_k$ .

Погрешности  $\sigma \Delta Q_1^k$  относятся к классу методических погрешностей, которые целесообразно снижать до величины, со-

Таблица 1. Погрешности поправок  $\delta \Delta Q_1$  к расходу тепла на турбоагрегат К-300-240 при неучете отклонений параметров  $t_o, t_{пп}, P_o, \delta P_{пп}, \eta_B, \eta_C, \eta_H, P_k$  от расчетных значений, %

Фактор, по изменению которого рассчитывается поправка	При отклонении всех параметров	При отклонении только $P_k$	
	N=100%	N=100%	N = 50%

Температура конденсата и питательной воды после

ПНД-2	17,5	16,9	29,4
ПНД-4	8,4	8,2	15,2
ПВД-6	8,2	8,0	15,0
ПВД-7	6,8	6,5	14,4

Переохлаждение конденсата в конденсаторе

49,3	49,0	87,6
------	------	------

Отключение:

ПНД-2	16,1	15,3	28,6
ПНД-4	8,4	8,2	15,0
группы ПВД	8,9	8,5	14,4

Отключение сливного насоса

ПНД №2 (дренаж направляется в конденсатор)

23,1	22,8	42,1
------	------	------

ставляющей 10 – 20% от инструментальных погрешностей информационно-вычислительных схем (ИВС), вызываемых главным образом погрешностью каналов измерения.

Относительные инструментальные погрешности поправок по факторам, которые показаны в табл. 1 равны (при фактической точности каналов измерения ИВС): при недогревах на  $10^{\circ}\text{C}$  воды в регенеративных подогревателях – 20 – 25%, при отключении регенеративных подогревателей –  $2 \div 5\%$ ; при отключении сливных насосов – 5 – 7%. Как видно из табл. 1, методические погрешности выше инструментальных.

Резюме. При определении поправок к расходу тепла по регенеративным изменениям тепловой схемы в первую очередь необходимо учитывать фактическое давление пара в конденсаторе.

### Л и т е р а т у р а

1. Рубинштейн Я.М., Щепетильников М.И. Расчет влияния изменений в тепловой схеме на экономичность электростанций. М., 1969.

УДК 621.039.554

В.С. Северянин, канд. техн. наук

### ОСОБЕННОСТИ АЭРОДИНАМИКИ КАМЕР ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ

Камеры пульсирующего горения (КПГ) – новый тип топочного аппарата, в котором резко интенсифицированы процессы горения и тепломассообмена. Явление самовсаса – следствие автоколебательного режима работы КПГ. В этом случае КПГ полностью снабжает себя воздухом для горения. Кроме того, КПГ без наддувных машин способна преодолеть определенное аэродинамическое сопротивление устройств в газовом тракте.

Схема КПГ гармонического типа показана на рис. 1, а. Приведем некоторые параметры работы КПГ: расход топлива через форсунку – 2 от 20 до 2000 кг/ч, частота пульсаций 30 – 150 Гц, амплитуда колебаний давления – до 0,1 бар, температура газов в выхлопном газоходе 6 после охлаждения 300–400 К в самой КПГ температура составляет 1800 – 2200 К.

В создании аэродинамической обстановки в КПГ огромную роль играет конструктивное оформление газозадушного тракта КПГ, и в первую очередь воздушных клапанов. Клапаны КПГ можно

разделить на два основных типа: механические (МК) и аэродинамические клапаны (АК). Основным критерием такого деления является наличие движущихся элементов (МК) или их отсутствие (АК). МК бывают флажковые, лепестковые, роторные, свободные, а также управляемые и неуправляемые (рис. 1, а, б, в, г, д, е) соответственно. Механизм действия МК прост. Основной недостаток МК – их недолговечность.

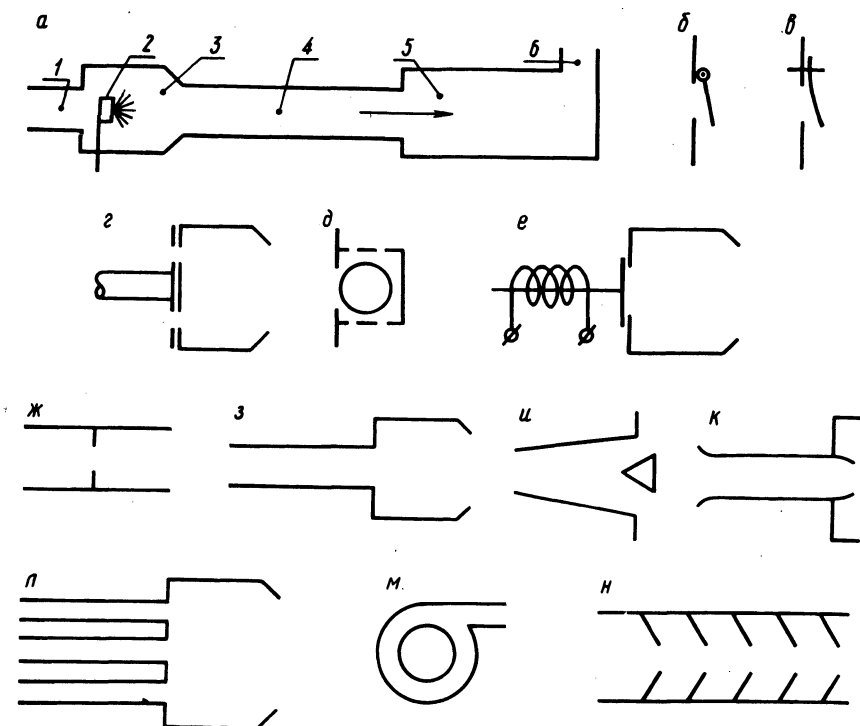


Рис. 1. Воздушные клапаны КПГ: а-общий вид КПГ; б-е - механические клапаны; ж-н - аэродинамические клапаны; 1 - клапан; 2 - форсунка; 3 - камера воспламенения; 4 - резонансная труба; 5 - объект воздействия (теплообменник); 6 - газоход.

Механизм действия АК намного сложнее работы МК. Как правило, АК работают с обратным пропуском газов, при этом коэффициент аэродинамического сопротивления клапана в прямом направлении  $\xi$  ниже, чем тот же параметр для обратного потока  $\xi_{обр}$ . Следует учитывать и параметры этих потоков, а также волновые явления. Последний фактор учитывается делением всех АК на активные и реактивные.

Пульсационный режим горения в удлиненном канале может появиться в том случае, если сечение всасывающего конца на 40 - 50% меньше сечения выхлопного (например, диафрагма, рис. 1,

ж – пример активного АК). Отрезок трубы определенного сечения и длины (рис. 1, з) создает реактивный АК. Если придать этому отрезку форму конуса с различными вставками (рис. 1, и), а также оформить, как показано, их торцы (рис. 1, к), то улучшится пульсационный режим в КПП. АК в виде группы сопел (рис. 1, л) наиболее удобен как в организации горения, так и в оформлении акустически закрытого конца КПП. Примером АК, в которых  $\xi_{пр} \ll \xi_{обр}$ , служат циклонные (рис. 1, м) и "жаберные" (рис. 1, н) АК.

Приведенные АК являются самостоятельным конструктивным элементом КПП, однако не всегда можно выделить клапан в явной форме (рис. 2). Роль клапанов здесь играют другие части КПП или сочетание этих частей (двухфазная КПП, рис. 2, а), компоновка (дипольная КПП, рис. 2, б) и особая форма (спиральная КПП, рис. 2, в).

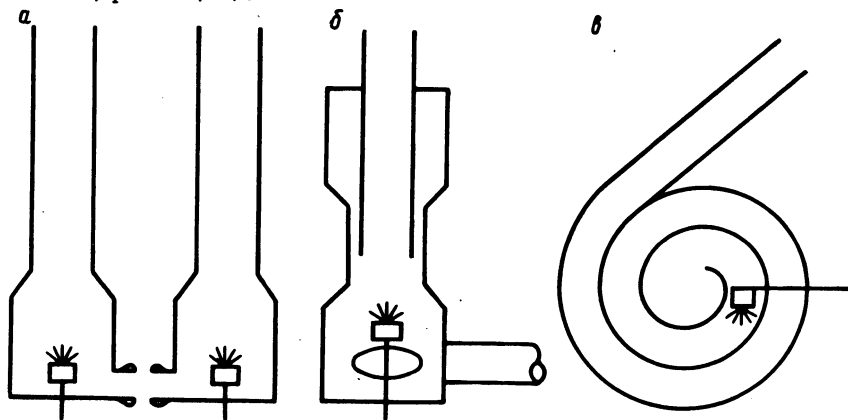


Рис. 2. Примеры КПП без явных клапанов: а – двухфазная; б – дипольная; в – спиральная.

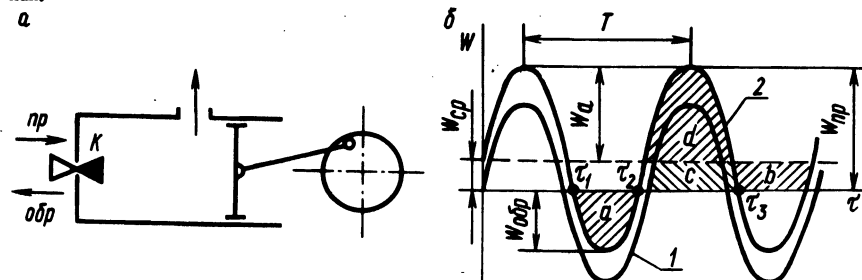


Рис. 3. Аэродинамическая модель КПП: а – теоретическая аналогия; б – распределение скоростей.

Если сопротивление устройства симметрично (одинаково в обоих направлениях), то скорости возле К (рис. 3, а) отобразят синусоидой 1 (рис. 3, б). Если сопротивление обратному по-

току выше, чем прямому, то течение изобразится линией 2 (рис. 3, б), т.е. реализуется среднерасходная скорость  $W_{\text{ср}}$  режима самовсаса. На рис. 3, б видно, что  $W_{\text{ср}}$  связана с амплитудой скорости  $W_a$ , а также с прямой  $W_{\text{пр}}$  и обратной скоростью  $W_{\text{обр}}$  так:

$$\left. \begin{aligned} W_{\text{пр}} + W_{\text{обр}} &= 2 W_a; \\ 2 W_{\text{ср}} &= W_{\text{пр}} - W_{\text{обр}} \end{aligned} \right\}$$

$$\text{или } W_{\text{ср}} = W_a \frac{\sqrt{\xi_{\text{обр}}} - \sqrt{\xi_{\text{пр}}}}{\sqrt{\xi_{\text{обр}}} + \sqrt{\xi_{\text{пр}}}}.$$

Вентильный эффект исходя из рис. 3, б

$$\begin{aligned} B &= \frac{d+c}{a} = 1 + \frac{B+c}{a} = \\ &= 1 + \frac{W_{\text{ср}} T}{\int_{\tau_1}^{\tau_2} W_a \sin \omega \tau d\tau - W_{\text{ср}} (\tau_2 - \tau_1)} = \\ &= 1 + \frac{\pi A}{\sqrt{1-A^2} - A \arccos A}, \text{ где } A = W_{\text{ср}} / W_a, \quad \omega = \\ &= 2\pi / T. \end{aligned}$$

При наличии внешнего дутья со скоростью  $W_g$  аэродинамический параметр  $A$  для изотермического течения равен

$$A = \frac{W_g}{W_a} + \frac{\sqrt{\xi_{\text{обр}}} - \sqrt{\xi_{\text{пр}}}}{\sqrt{\xi_{\text{обр}}} + \sqrt{\xi_{\text{пр}}}} = A_1 + A_2.$$

Таким образом,  $A$  учитывает свойства потока и конструкцию клапана.

Учет неизотермичности следует вести через соотношение плотностей горячего выхлопа и холодного всаса, а волновые свойства - через добавочное инерционное слагаемое. Так как в стоячей волне скорости и колебания давления сдвинуты по фазе на  $\pi/2$ , то описанный объемный вентильный эффект равен массовому. Рабочее значение вентильного эффекта  $B > 1$  достигается при  $A > 0$ . При этом  $W_{\text{ср}} > 0$  при любых  $W_a$ .



Если  $A = 0$ , то  $B = 1$ , т.е. клапан одинаково пропускает в обе стороны даже при  $\zeta_{\text{пр}} > \zeta_{\text{обр}}$ . При  $A = 1$   $B \rightarrow \infty$ , т.е. должно быть  $\zeta_{\text{пр}} = 0$  или  $\zeta_{\text{обр}} = \infty$  (случай, приближающийся к МК).

Резюме. Аэродинамику КПП формирует воздушная клапанная система, вентильный эффект которой зависит от свойств клапана и потока.

УДК 536.246

В.Ф. Степанчук, докт. техн. наук,  
Е.Г. Мигуцкий, канд. техн. наук

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ДВУХФАЗНЫХ ВОДО-ВОЗДУШНЫХ ПОТОКАХ

В качестве одного из методов интенсификации теплообмена в однофазных воздушных потоках можно предложить впрыск воды в воздушный поток и использование таким образом двухфазного водо-воздушного потока. В связи с этим возникла необходимость детального исследования процесса теплообмена в двухфазных водо-воздушных потоках, которое позволило бы получить критериальные зависимости для расчета коэффициента теплоотдачи в двухфазных водо-воздушных потоках.

Эксперименты проводились [1] в интервале изменения числа  $Re$  от  $5,1 \cdot 10^3$  до  $4,12 \cdot 10^4$ , действительной плотности орошения  $N$  от 0 до  $0,204 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  и среднего температурного напора  $\Delta \bar{T}$  от 5 до 105 К для калориметров диаметром 12, 14, 18 и 20 мм при среднем диаметре капель в двухфазном потоке  $d_k = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ . Температура двухфазного потока изменялась от 283,7 до 299,3 К. Значения критериев Рейнольдса и Нуссельта определялись по диаметру трубки и теплофизическим свойствам жидкости.

Так как с ростом среднего температурного напора  $\Delta \bar{T}$  в двухфазных потоках коэффициент теплоотдачи сначала возрастает, затем при  $\Delta \bar{T} = \Delta \bar{T}_{\text{кр}}$  имеет максимальное значение и, наконец, с дальнейшим ростом  $\Delta \bar{T}$  уменьшается, полученные экспериментальные данные обрабатывались отдельно для областей  $\Delta \bar{T} < \Delta \bar{T}_{\text{кр}}$  и  $\Delta \bar{T} > \Delta \bar{T}_{\text{кр}}$ .

В результате обработки экспериментальных данных для области  $\Delta \bar{T} < \Delta \bar{T}_{\text{кр}}$  получено, что при  $0 \leq N_g \leq 0,045 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

$$\overline{Nu} = \overline{Nu}_0 + 136 Re^{0,25} \left( \frac{\overline{T}_{ст}}{T_{пот}} \right)^5 \left( \frac{H_g}{H_{g\max}} \right)^{1,3}; \quad (1)$$

при  $0,045 \leq H_g \leq 0,204 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

$$\overline{Nu} = \overline{Nu}_0 + 28,4 Re^{0,25} \left( \frac{\overline{T}_{ст}}{T_{пот}} \right)^5 \left( \frac{H_g}{H_{g'\max}} \right)^{0,35} \quad (2)$$

и для области  $\Delta \overline{T} > \Delta \overline{T}_{кр}$  при  $0 \leq H_g \leq 0,204 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

$$\overline{Nu} = \overline{Nu}_0 + 398 Re^{0,15} \left( \frac{\overline{T}_{ст}}{T_{пот}} \right)^{-4} \left( \frac{H_g}{H_{g\max}} \right), \quad (3)$$

где  $H_{g\max} = 0,204 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

Число Нуссельта для однофазного потока определяется по уравнению [2]

$$\overline{Nu}_0 = 0,25 Re^{0,6} Pr_{ж}^{0,33} \quad (4)$$

Для определения области применимости уравнений (1) - (3) необходимо знать величину среднего критического температурного напора  $\Delta \overline{T}_{кр}$ . Для получения уравнения, позволяющего определять величину  $\Delta \overline{T}_{кр}$ , экспериментальные данные для максимальных значений среднего коэффициента теплоотдачи и соответствующих им значений  $\Delta \overline{T}_{кр}$  обрабатывались в виде зависимости

$$K = f \left( \frac{H_g}{H_{g\max}} \right)^n, \quad (5)$$

где  $K = \frac{r}{c_p \Delta \overline{T}_{кр}}$  - число Кутателадзе;  $c_p$  - изобарная теплоемкость.

В результате обработки получено уравнение для определения среднего критического температурного напора

$$\Delta \overline{T}_{кр} = C \left( \frac{H_g}{H_{g\max}} \right)^{0,5}, \quad (6)$$

где  $C$  - коэффициент, зависящий от температуры набегающего двухфазного потока, определяется по уравнению

$$C = 351 - 1,05 T_{пот} \quad (7)$$

Резюме. Получены критериальные уравнения для расчета коэффициента теплоотдачи в теплообменниках с двухфазными водо-

воздушными потоками для областей  $\Delta \bar{T} < \Delta \bar{T}_{кр}$  и  $\Delta \bar{T} > \Delta \bar{T}_{кр}$  и уравнения для определения  $\Delta \bar{T}_{кр}$ .

### Л и т е р а т у р а

1. Мигуцкий Е.Г. Исследование теплоотдачи в водо-воздушных потоках. – В сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики, вып. 1. Минск, 1974. 2. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. М., 1975.

УДК 621.1.016.4

В.Ф. Степанчук, докт. техн. наук, М.Л. Гурис

### К ТЕОРИИ КИПЕНИЯ

Основные современные представления о физической природе процесса кипения основываются на теории фазовых переходов Я.И. Френкеля [1].

Основное уравнение теории кипения в [1] выводится на базе анализа процесса конденсации.

Для случая конденсации пара полный термодинамический потенциал системы пар (А) – жидкая копия (В) записывается в виде

$$\Phi = N_A \varphi_A + N_B \varphi_B + 4\pi R^2 \sigma, \quad (1)$$

где  $N_A$  и  $N_B$  – числа частиц в фазах А и В;  $\varphi_A$  и  $\varphi_B$  – потенциалы, отнесенные к одной частице соответствующей фазы (без учета поверхностных эффектов, т.е. при  $R \rightarrow \infty$ ) при заданной температуре  $T$  и внешнем давлении, равном давлению пара.

Термодинамическое равновесие рассматриваемой системы определяется условием  $d\Phi = 0$  при  $N_A + N_B = \text{const}$ , что приводит к уравнению

$$\varphi_B - \varphi_A + 4\pi \sigma \frac{dR^2}{dN_B} = 0. \quad (2)$$

Обозначая объем, приходящийся на одну молекулу жидкости, через  $v_B$  и, полагая,  $N_B = \frac{4\pi}{3} \frac{R^3}{v_B}$ , получаем

$$\varphi_B - \varphi_A + \frac{2\sigma}{R} v_B = 0. \quad (1a) \text{ [Френкель Я.И., с.337]}$$

Далее выполняется переход к вскипанию, рассматривается система – сферический зародыш пара в объеме жидкости. "Для то-

го, чтобы получить более точный результат, справедливый при сколь угодно малых значениях  $R$ , необходимо исходить из дифференциальной формы уравнения (1а), т.е.

$$(s_B - s_A) dT \equiv \lambda \frac{dT}{T} = d \frac{2\sigma v_B}{R} \quad \text{[Френкель Я.И., с.341]}$$

где  $s$  - энтропия, равная  $\frac{d\varphi}{dT}$ .

"Считая скрытую теплоту испарения  $\lambda$ , не зависящей от температуры, получаем

$$\ln \frac{T}{T_s} = \frac{2\sigma v_B}{\lambda R} = \frac{2\sigma k T}{\lambda R P} \quad (3) \quad \text{[Френкель Я.И., с.342]}$$

Очевидно, что применение уравнения (1а) при вскипании жидкости ошибочно, так как при его выводе было принято допущение, что  $v_B = \text{const}$ , верное только для случая конденсации.

Если учесть зависимость объема пара от давления и температуры  $v_B = \frac{kT}{P}$ , число молекул в пузырьке определится уравнением

$$N_B = \frac{4}{3} \frac{\pi R^3}{v_B} = \frac{4\pi R^3 P}{3kT}$$

$$\text{или } N_B = \frac{4}{3} \frac{\pi}{kT} R^3 \left( P_0 + \frac{2\sigma}{R} \right),$$

где  $P_0$  - статическое давление жидкости;  $\frac{2\sigma}{R}$  - избыточное капиллярное давление пара.

$$\text{Откуда } \frac{\partial N_B}{\partial R} = \frac{4}{3} \frac{\pi}{kT} R (3 P_0 + 4\sigma)$$

и уравнение (2) должно быть переписано в виде

$$\varphi_A - \varphi_B = \frac{6kT\sigma}{3P_0 R + 4\sigma}.$$

Следовательно, зависимость температуры вскипания жидкости от радиуса зародыша и параметров описывается не выведенным в [1] уравнением (3), а уравнением

$$\ln \frac{T}{T_s} = \frac{6kT\sigma}{r(3P_0 R + 4\sigma)} \quad (4)$$

Скорость вскипания в [1] характеризуется вероятностным множителем  $e^{-\frac{\Delta\Phi_B}{kT}}$ .

Согласно расчетам Я.И. Френкеля, значительная скорость вскипания соответствует вероятности

$$e^{-\frac{\Delta\Phi_B}{kT}} = 10^{-20}.$$

Радиус критического зародыша находится из уравнения

$$\frac{\Delta\Phi_B}{kT} = \frac{4}{3} \cdot \frac{\pi R^2}{kT} \sigma = 20 \cdot 2,3 = 47$$

и равен  $R = 10^{-9}$  м.

Такому радиусу, согласно уравнению (3), соответствует перегрев порядка 1000 К, что заставило Я.И. Френкеля признать, что "теория вскипания перегретой жидкости остается пустой схемой, имеющей весьма ограниченное значение для понимания действительных явлений, если не принимать во внимание факторов, облегчающих эти процессы и практически всегда имеющих в наличии" [1].

Согласно уточненному уравнению вскипания (4) радиусу  $R = 10^{-9}$  м соответствует перегрев  $\Delta T = 45$  К, что достаточно близко к реально осуществляемым величинам.

Резюме. Учет зависимости удельного объема от давления для паровой фазы в известном уравнении Я.И. Френкеля снижает перегрев, обеспечивающий заметную скорость вскипания, до  $45^\circ\text{C}$ .

#### Л и т е р а т у р а

1. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкости. М. - Л., 1945.

УДК 536.244

А.М. Заватко, Л.И. Тарасевич, канд. техн. наук,  
Г. А. Фатеев, канд. техн. наук

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ПЛОТНОГО СЛОЯ В РЕЖИМЕ ТЕПЛОВЫХ ВОЛН

Принцип обработки слоя дисперсного материала в режиме резонансных тепловых волн следует из условий реакционного теплообмена, складывающихся в агломерационном процессе [1, 2]. Тепло, подведенное к поверхности тела в первый период процесса

под влиянием фильтрующего потока газа, заглубляется внутрь тела, перемещаясь в виде тепловой волны. Вследствие особых условий взаимосвязи переносов тепла и реагирования в слое формируется узкая реакционная зона горения частиц твердого топлива, перемешанного с инертным материалом, и перемещающаяся примерно синхронно с тепловой волной. Этим и определяется условие теплового резонанса [2].

При обработке слоя в режиме теплового резонанса достигается значительная экономия тепла в сравнении со способом разогрева слоя по всей его массе [3].

Стремление распространить метод теплового резонанса на некоторые другие технологические процессы, использовать его при термической регенерации насыщенного слоя адсорбента позволяет отказываться от реакционной системы, заменив ее системой дискретно расположенных и попеременно включаемых источников тепла [4]. Такая система утрачивает свою способность к саморегулированию, присущую реакционным системам [5].

Для устранения указанного недостатка был разработан саморегулируемый источник тепла, представляющий последовательно соединенную цепь электрического источника тепла (спирали) и нелинейного элемента (термистора). Подобно реагирующей частице мощность, выделяемая в цепи под взрывным пределом, экспоненциально связана с температурой

$$W_T = \frac{V^2}{R_T} \exp\left(-\frac{B}{T}\right)$$

или, используя метод разложения экспоненты по Франк-Каменецкому [5],

$$W_T = \frac{V^2}{R_0} \exp(\alpha_T t_T).$$

Закон конвективного охлаждения термистора газовым потоком примем в виде

$$W_{\Pi} = S\alpha(t_T - t_{\Pi}).$$

Вводя параметрическую связь между мощностями, выделяемыми в нелинейной цепи, и мощностью, отводимой от термистора в поток, запишем следующую систему соотношений:

$$\begin{aligned} \frac{W_{\text{сп}}}{W_0} &= \frac{X^2}{(1+X)^2}; & \frac{W_T}{W_0} &= \frac{X}{W_0} = \frac{X}{(1+X)^2}; & \frac{W_{\Sigma}}{W_0} &= \\ &= \frac{X}{1+X}; & & & & \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{W_{\Pi}}{W_0} = \frac{S \alpha R_{\text{СП}}}{\alpha_{\tau} V^2} \left[ Z - \ln \left( \frac{R_{\text{СП}}}{R_0^{\text{СП}}} \right) - \alpha t_{\Pi} \right]. \quad (2)$$

Здесь  $X = 1^Z$ ;  $X = \frac{R_{\text{СП}}}{R_{\tau}}$ ;  $W_{\tau}$ ,  $W_{\text{СП}}$ ,  $W_{\Sigma}$  - мощности термистора, спирали и суммарная цепи соответственно,  $W_0$  - мощность спирали при нулевом сопротивлении термистора,  $R_{\tau}$ ,  $R_{\text{СП}}$  - сопротивление термистора и спирали соответственно,  $R_0^{\text{СП}}$  - сопротивление холодного термистора,  $t_{\tau}$ ,  $t_{\Pi}$  - температура термистора и потока соответственно,  $\alpha_{\tau}$  - температурный коэффициент сопротивления,  $\alpha$ ,  $S$  - коэффициент и поверхность теплообмена соответственно,  $V$  - напряжение.

Система (1) - (2) имеет то достоинство, что нелинейные выражения мощностей (1) являются функцией только параметра  $Z$ , и инвариантна ко всем физическим параметрам, которые вошли в уравнение мощности конвективного охлаждения (2), линейного относительно параметра  $Z$ . Кривые мощностей нелинейной цепи и прямые мощности конвективного охлаждения по параметру  $Z$  представлены на рис. 1.

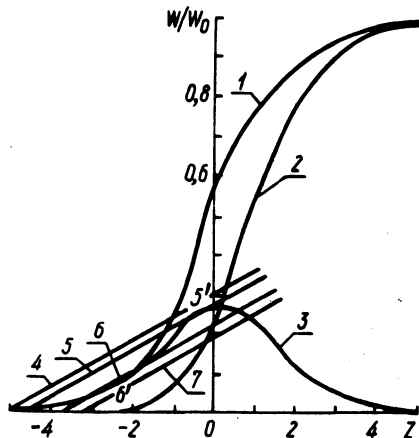


Рис. 1. Кривые относительных мощностей: 1, 2, 3 - соответственно суммарная нелинейная цепь, спирали, термистора; 4-7 - прямые конвективного охлаждения термистора.

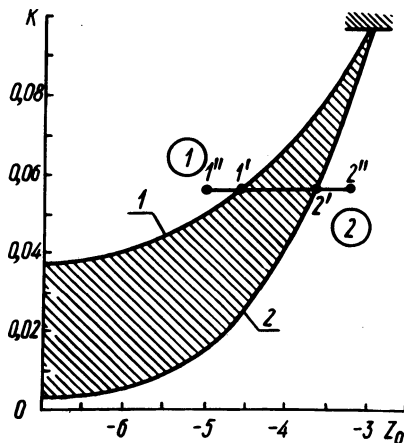


Рис. 2. Области затухания 1 и воспламенения 2 для нелинейной цепи.

Моделирование условий реакционного теплообмена требует, чтобы система была устойчива до подхода тепловой волны к источнику тепла (источник при этом должен быть отключен). Такое соотношение может быть задано прямой 4 относительно кривой 3

(рис. 1). При смещении температуры потока вследствие набегающей тепловой волны прямая конвективного охлаждения соответственно занимает положения 5, 6, при котором моделируется эффект воспламенения и, наконец, положение 7, соответствующее амплитуде тепловой волны. На ниспадающей ветке тепловой волны прямая конвективного охлаждения проходит обратные положения 7, 6, 5, при которых моделируется эффект затухания, и, наконец, возвращается к исходному положению 7. Моделирование эффектов воспламенения и затухания при различном относительном положении функций мощности выделения и отвода тепла на рис. 1 обуславливает гистерезис обратного протекания процесса.

Методика расчета при проектировании параметров регулируемого источника тепла может быть проиллюстрирована с помощью рис. 2. Здесь кривая 1 коррелирует между собой угловой коэффициент касательной к кривой 3 рис. 1 и величину  $Z_0$ , отсекаемую этой касательной на оси  $Z$  после точки перегиба. Кривая 2 сопоставляет те же параметры, но до точки перегиба. Следовательно, кривая 1 соответствует предельным условиям затухания, кривая 2 – условиям воспламенения.

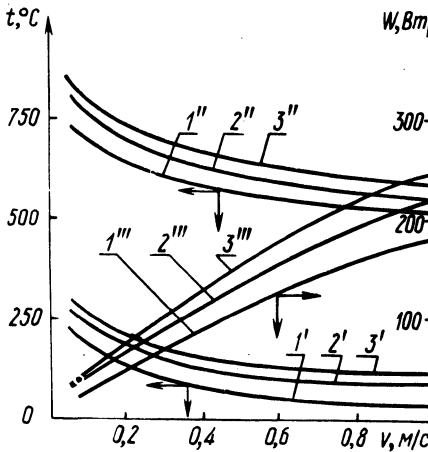


Рис. 3. Температура воспламенения ( $1', 2', 3'$ ) максимального разогрева ( $1'', 2'', 3''$ ) термистора и суммарная мощность нелинейной цепи от скорости газового потока при сопротивлении холодного термистора (Ом) 1-100, 2-200, 3-300.

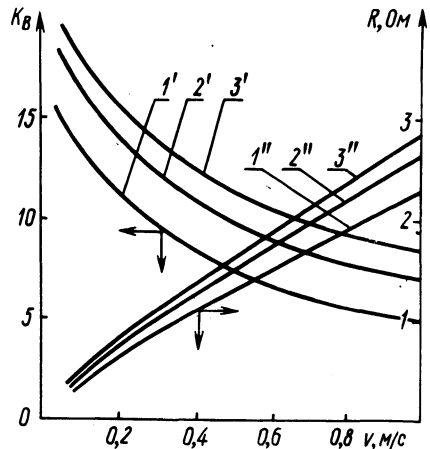


Рис. 4. Скачок мощности при воспламенении ( $1', 2', 3'$ ) и сопротивление спирали ( $1'', 2'', 3''$ ) от скорости газового потока при сопротивлении холодного термистора (Ом): 1-100, 2-200, 3-300.

Проектирование процесса состоит в том, чтобы исходное состояние источника соответствовало точке в области затухания 1 (рис. 2). Это обеспечит отключение источника после прохождения тепловой волны. При прохождении амплитуды тепловой волны



условия процесса должны сместиться в область воспламенения 2 (рис. 2). Отрезок  $1'' - 2''$  на рис. 2 иллюстрирует процесс, воспроизведенный на рис. 1, причем соотношение кривой 3 и прямой 4 на рис. 1 представлено точкой  $1''$  относительно кривой 1 на рис. 2, точка  $1'$  соответствует прямой  $5,2'$  - прямой  $6,2''$  - прямой 7 на рисунках 2 и 1 соответственно.

В качестве нелинейного элемента для регулируемых источников тепла предполагается использовать пусковой термистор [6]. Он имеет следующие номинальные параметры: поверхность теплообмена  $0,0031 \text{ м}^2$ , температурный коэффициент сопротивления  $0,0098 \frac{1}{\text{C}}$ , предельную силу тока  $10 \text{ А}$ , сопротивление при  $20^\circ \text{C}$   $100 \text{ Ом}$ . Примем закон конвективного теплообмена в виде [7]

$$\text{Nu} = 0,106 \text{ Re}$$

Зададимся амплитудой тепловой волны  $300^\circ \text{C}$ , достаточной для регенерации слоя цеолита от  $\text{CO}_2$ . Предельные значения параметров для этих условий представлены на рис. 3 и 4 кривыми 1. Кривые 2 и 3 (рис. 3, 4) показывают, как изменяются параметры регулируемых источников тепла, если сопротивление термистора увеличить до  $200$  и  $300 \text{ Ом}$ .

Резюме. Представленные результаты показывают принципиальную осуществимость процесса с помощью имеющихся технических средств и позволяют сконструировать электрическую цепь, содержащую несколько термисторов, для осуществления технической обработки слоя в режиме резонансных тепловых волн.

#### Л и т е р а т у р а

1. Voice E.W., Wild R. Heat agglomeration research. - Iron and Coal Trades Review, 1957, N175.
2. Фатеев Г.А. Перенос тепла в реагирующем пористом теле при наличии фильтрации газа. - В сб.: Тепло- и массообмен при фазовых и химических превращениях. Минск, 1963.
3. Вегман Е.Ф. Процесс агломерации. М., 1963.
4. Бицютко И.Я. и др. Тепловая эффективность обработки продуваемого слоя распределенными источниками тепла. - В сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики, вып. 2. Минск, 1975.
5. Франк - Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., 1967.
6. Шефтель И.Т. Терморезисторы. М., 1973.
7. Тимофеев В.Н. Теплообмен в слое. - "Изв. ВТИ", № 2, 1949.

А.Н. Иванистов,  
Г.С. Кабалдин, канд. техн. наук

## АНАЛИЗ И РАСЧЕТ НОРМ РАСХОДА ТОПЛИВА В ПРОЦЕССАХ СУШКИ

Статистические методы планирования эксперимента являются активными для ведения экспериментов и нашли применение в практике [1].

В данном исследовании анализируется работа сушильного барабана и определяется полиномиальная зависимость удельного расхода топлива ( $b$ ) от основных факторов, влияющих на процесс сушки. При этом используется метод планирования эксперимента.

По экспертной оценке выделены основные факторы процесса: производительность барабана по влажному материалу ( $G$ ), начальная влажность материала ( $\omega_1$ ), расход первичного воздуха на сжигание мазута ( $A_1$ ) и температура дымовых газов на входе в барабан ( $T_1$ ).

В дальнейшем для удобства расчетов были использованы безразмерные, кодированные величины:

$$X_1 = \frac{G - 72,5}{7,5}; X_2 = \frac{\omega_1 - 8,5}{0,5}; X_3 = \frac{A_1 - 15,5}{2};$$

$$X_4 = \frac{T_1 - 850}{50} \quad (1)$$

Таблица 1

Факторы	Уровни факторов			Интервал варьирования
	(-)	(0)	(+)	
Производительность барабана, т/ч	65	72,5	80	7,5
Начальная влажность материала, %	8,0	8,5	9,0	0,5
Температура дымовых газов на входе в барабан, °С	800	850	900	50
Расход первичного воздуха, тыс. нм <sup>3</sup> /ч	13,5	15,5	17,5	2

Уровни факторов и интервалы их варьирования приведены в табл. 1.

Расчеты проводились с применением матрицы планирования полного факторного эксперимента [1].

Получено следующее интерполяционное уравнение удельного расхода топлива:

$$\bar{b} = 10,61 - 1,3X_1 + 0,058X_2 + 1,62X_3 + 0,878X_4 - 0,1X_1X_2 - 0,1X_1X_3 + 0,04X_1X_4 + 0,093X_2X_3 + 0,02X_2X_4 + 0,014X_3X_4. \quad (2)$$

Для оценки коэффициентов уравнения регрессии определим дисперсию адекватности

$$S_b^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (b_i - \hat{b}_i)^2}{n - k} = 0,0282, \quad (3)$$

где  $\hat{b}_i$  - значение удельного расхода топлива, найденное по уравнению регрессии (2) для  $i$ -ой точки;  $b_i$  - экспериментальное значение удельного расхода в  $i$ -ой точке;  $n$  - число опытов;  $k$  - количество коэффициентов модели.

Ошибка в определении коэффициентов регрессии

$$S_a = \sqrt{\frac{S_b^2}{n}} = 0,042.$$

Для  $P = 0,95$  и  $f = 16$  значение критерия Стьюдента равно  $t = 2,12$ , тогда  $S_a \cdot t = 0,09$ , т.е. значимыми являются те коэффициенты, которые по абсолютной величине более 0,09. В результате получим

$$\bar{b} = 10,61 - 1,3X_1 + 1,62X_3 + 0,878X_4 - 0,1X_1X_2 - 0,1X_1X_3 + 0,114X_3X_4. \quad (4)$$

Критерий Фишера  $F = 6,6$ , а  $F_{\text{таб}} = 8,7$ , т.е. уравнение адекватно описывает зависимость удельного расхода топлива от основных факторов процесса сушки.

Уравнение регрессии в натуральных величинах имеет вид

$$b = 13,21 + 0,157 G + 1,933 \omega_1 + 0,324A_1 - 0,0267 G \omega_1 - 0,00667 G \cdot A_1 + 0,00114A_1 \cdot T_1. \quad (5)$$

Анализ уравнения (5) показывает: удельный расход топлива увеличивается с уменьшением производительности барабана; повышение расхода первичного воздуха и температуры дымовых газов на входе в барабан увеличивают удельный расход топлива.

Полученная зависимость удельного расхода топлива справедлива для барабанов диаметром 3,2 м и длиной 22 мм при высушивании хлористого калия и изменении параметров процесса в следующих пределах: расход топлива (мазут М-100) 600 - 1200 кг/ч, производительность по влажному материалу 65 - 80 т/ч, начальная температура газов на входе в барабан - 800 - 900 °С, конечная влажность продукта 2%, начальная влажность материала 7 - 10%.

Резюме. Обоснована возможность применения метода планирования эксперимента для расчета удельного расхода топлива при высушивании хлористого калия с учетом влияния на него производительности барабана, начальной влажности материала, расхода первичного воздуха и температуры на входе в сушильный барабан.

Полученная зависимость  $b = f(G, \omega_1, A_1, T_1)$  может быть использована при анализе и планировании удельного расхода топлива в сушильном барабане.

#### Л и т е р а т у р а

1. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М., 1965.

УДК 697.92

Л.И. Темкин, А.П. Несенчук, канд. техн. наук

#### ОХЛАЖДЕНИЕ ФОРМОВОЧНОГО ПЕСКА В ВИХРЕВОМ ПОТОКЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

В пескоприготовительных отделениях литейных цехов ряда машиностроительных заводов песок, идущий на приготовление стержней, имеет высокую температуру. Так, для Минского автомобильного завода температура песка составляет примерно 323 - 333 К, для Бобруйского машиностроительного завода - 343 К.

Высокая температура песка отрицательно влияет на физические свойства материала при изготовлении стержней, что в свою очередь ведет к значительному браку (величина его составляет 20 - 30%). Применяемое в настоящее время естественное охлаждение в бункерах не обеспечивает достаточного снижения температуры (293 - 303 К).

В данной работе необходимо было изучить и выработать практические мероприятия и рекомендации для их дальнейшего ис-

пользования в пескоприготовительных отделениях литейных цехов при охлаждении формовочного песка в вихревом потоке.

Сущность охлаждения песка в вихревом потоке состоит в том, что подвод воздуха осуществляется тангенциально в теплообменник, выполненный в виде цилиндрической камеры.

Испытания проводились на стеклянной модели, подобной образцу в гидродинамическом и тепловом отношениях. Диаметр и высота модели соответственно равны 50 и 800 мм. Подвод воздуха от высоконапорного вентилятора осуществлялся в двух поясах со скоростью на срезе сопла примерно равной 40 м/с (оптимальный режим). В каждом поясе располагалось по три сопла. Высота активной зоны охлаждения модели и образца регулировалась путем изменения производительности установки по охлаждаемому материалу и воздуху (средняя скорость воздуха в активной зоне колебалась в интервале 8 – 15 м/с. На выходе из камеры устанавливался ряд циклонов для улавливания уноса песка.

Песок стандартного фракционного состава (литейные участки ковкого и серого чугуна) поступал в камеру сверху по периферии теплообменника. Подача песка непосредственно в камеру осуществлялась с помощью конуса, выполняющего роль распределителя материала по периферии камеры. Песок отбрасывался струей воздуха к стенкам теплообменника и перемешался по спиралеобразной траектории, в результате чего его концентрация у стенки оказывалась максимальной. При этом наиболее тяжелые частицы располагались ближе к стенке. В результате трения частиц песка о стенку и вихревого движения газовой фазы создавались большие относительные скорости частиц, обеспечивающие высокий коэффициент теплообмена. Как показали расчеты, такие скорости охлаждения нельзя создать ни в трубах-сушилках, ни в установках с кипящим слоем. Опыты не показали сколько-нибудь заметного истирания частиц песка, чего нельзя сказать о стенке цилиндрической камеры, которая покрывалась металлическими или синтетическими защитными элементами.

Рассматривая изучаемую модель, можно отметить, что в завихренном потоке значительно интенсифицируется конвективный теплообмен, причем в интенсификации особая роль принадлежит центробежным силам, так как в криволинейном потоке вблизи вогнутой стенки увеличивается массовая скорость потока и уменьшается толщина пограничного слоя.

Проводя испытания модели для охлаждения песка в вихревом потоке и выполняя тепловой и аэродинамический расчеты, важно было определить напряженность живого сечения установки по

песку, так как этот параметр позволяет перейти к расчету реальной установки.

В результате испытаний можно сделать следующие выводы:

1) изменяя производительность по песку и по воздуху таким образом, чтобы добиться требуемой температуры песка на выходе из теплообменника ( $20 - 30^{\circ}\text{C}$ ), была получена зависимость напряженности  $K$  живого сечения активной зоны по материалу в зависимости от необходимой конечной его температуры (рис. 1). Заштрихованная часть графика (рис. 1) указывает область оптимальной работы теплообменника (температуры материала на выходе  $293 - 313\text{ K}$  и  $K = 3 - 5\text{ кг/м}^2\text{с}$ ).

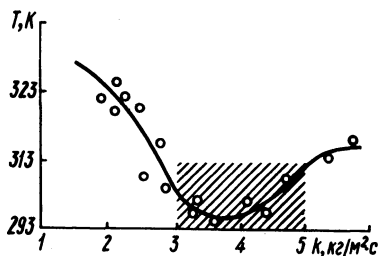


Рис. 1. Напряжение живого сечения охладителя в зависимости от температуры песка.

Как видим, оптимальный режим работы установки в зависимости от конечной температуры формовочного материала находится в пределах  $3 - 5\text{ кг/м}^2\text{с}$ , что при переходе к реальной производительности пескоприготовительных отделений литейных цехов ковкого и серого чугуна МАЗа с учетом перспективного увеличения производительности по песку до  $30\text{ т/ч}$  даст размеры образца: диаметр  $- 1,5\text{ м}$ , высота  $- 8,5\text{ м}$ .

Оптимальный угол расположения сопел в горизонтальной плоскости  $- 60^{\circ}$ , в вертикальной  $- 20^{\circ}$ .

Кроме того, для увеличения длительности пребывания крупных частиц в камере, а также для снижения запыленности цеха при выходе песка на конвейер внизу теплообменника необходим перемешивающий режим.

Резюме. Установка для охлаждения песка в вихревом потоке хорошо вписывается в технологическую схему пескоприготовительных отделений литейных цехов серого и ковкого чугуна МАЗа и ряда других заводов. Она является достаточно работоспособной.

#### Л и т е р а т у р а

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М., 1967.

С.В. Сомова, А.П. Несенчук, канд. техн. наук

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОСТЕРИЧЕСКОЙ ТЕПЛОТЫ АДсорбЦИИ  
СИНТЕТИЧЕСКИХ ЦЕОЛИТОВ

Существуют два метода определения теплот адсорбции: метод непосредственного калориметрического измерения изотермической интегральной теплоты адсорбции и косвенный метод вычисления дифференциальных (изостерических) теплот адсорбции по изотермам.

Косвенный метод определения изостерических теплот адсорбции основан на общепринятых термодинамических положениях и базируется на выражении [1]

$$RT^2 \left( \frac{\partial \ln p}{\partial T} \right)_a q_d + RT = q_{из}, \quad (1)$$

где  $q_{из}$  - изостерическая теплота адсорбции;  $q_d$  - дифференциальная теплота адсорбции,  $q_d = H_\Gamma - H_a - a \left( \frac{\partial H_a}{\partial a} \right)_T$ .

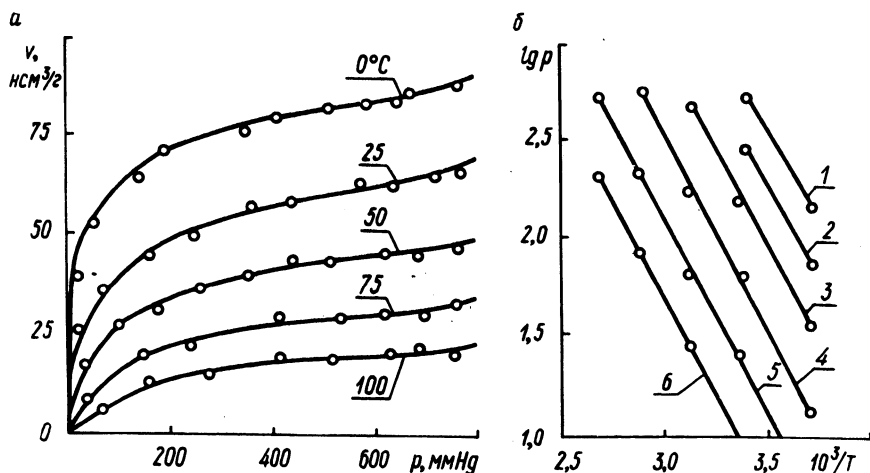


Рис. 1. Изотермы (а) и изостеры (б) адсорбции  $\text{CO}_2$  цеолитом MgA; 1 - 6 - соответственно для значений 60, 50, 40, 30, 20 и 10  $\text{нсм}^3/\text{г}$ .

Здесь  $H_\Gamma$  и  $H_a$  - соответственно теплосодержания моля газа в газовой и адсорбционной фазах;  $a$  - количество адсорбированного вещества.

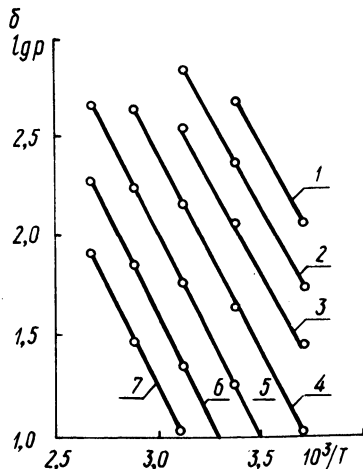
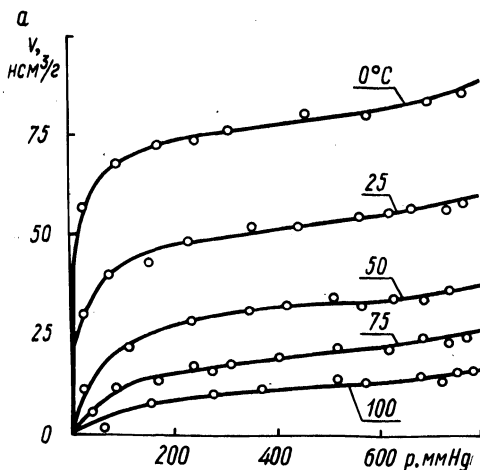


Рис. 2. Изотермы (а) и изостеры (б) адсорбции  $\text{CO}_2$  цеолитом СА. А: 1 - 7 - соответственно для значений адсорбции 60, 50, 40, 30, 20, 10 и 5  $\text{нсм}^3/\text{г}$ .

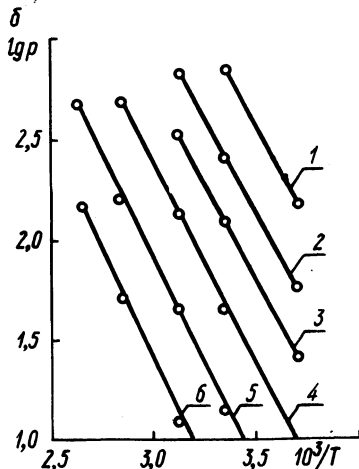
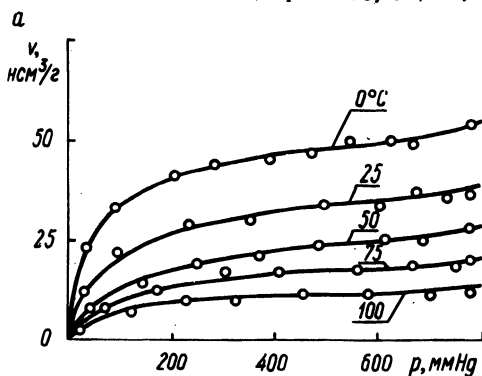


Рис. 3. Изотермы (а) и изостеры (б) адсорбции  $\text{CO}_2$  цеолитом NaA. 1 - 6 - соответственно для значений адсорбции 30, 25, 20, 15, 10 и 5  $\text{нсм}^3/\text{г}$ .

Таблица 1. Изостерические теплоты адсорбции  $\text{CO}_2$  синтетическими цеолитами, кал/моль

Тип цеолита	Величина адсорбции, $\text{нсм}^3/\text{г}$								
	5	10	15	20	25	30	40	50	60
MgA	-	11050	-	10750	-	10440	10120	9810	9500
CaA	12250	11950	11620	11320	-	10680	10370	9990	9800
NaA	10750	10520	10290	10060	9830	9600	-	-	-



Интегральная форма выражения (1) для малого интервала температур и давлений будет

$$q_{\text{из}} = R \frac{2,3 \lg \frac{P_1}{P_2}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} = -R \frac{\partial \ln p}{\partial \left(\frac{1}{T}\right)}, \quad (2)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  - равновесные давления для одного и того же количества адсорбированного вещества при температурах  $T_1$  и  $T_2$ .

Выражение (2) аналогично уравнению Клаузиуса-Клапейрона, в котором теплота адсорбции занимает место теплоты конденсации.

В дальнейшем теплота адсорбции определялась по (2) в соответствии с данными эксперимента. При построении изотерм адсорбции величину последней измеряли весовым методом с использованием сорбционных весов Мак-Бэна с учетом поправки на плавучесть адсорбента [1, 2]. Опыты проводились с синтетическими цеолитами CaA, MgA, NaA. Перед опытом образцы прокаливались при температуре 673 К и давлении  $10^{-2}$  мм рт. ст. в течение шести часов. Полученные изотермы представлены на рис. 1 - 3, а; на рис. 1 - 3, б показана зависимость логарифма давления от абсолютной температуры при постоянной величине адсорбции. Угловой коэффициент этих прямых дает значение исторических теплот адсорбции.

Результаты работы сведены в табл. 1.

Резюме. Теплота адсорбции рассмотренных цеолитов имеет наибольшее значение для первых порций адсорбированного газа и постепенно уменьшается по мере увеличения адсорбции.

Полученные экспериментальные данные могут найти применение при расчете сорбционных и регенерационных колонок с твердым адсорбентом.

#### Л и т е р а т у р а

1. Мак-Бэн Д. Сорбция газов и паров твердыми телами. М., 1934.
2. Брунауэр С. Адсорбция газов и паров. М., 1948.

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.1:537.312.62

Г.Е. Поспелов, докт. техн. наук,  
В.Т. Федин, канд. техн. наук

### ОБ УЧЕТЕ РАСПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ КРИОГЕННЫХ ЛИНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ

Известно, что в расчетах нормальных воздушных линий при длинах более 300 км возникает необходимость учета распределенности параметров линий [1]. Для кабельных криогенных линий анализ необходимости такого учета до сих пор не производился.

Криогенные линии можно рассматривать как линии без потерь. Тогда параметры П-образной схемы замещения линии можно представить в виде

$$Z = jx = jk_x x_0 l; \quad (1) \quad Y = jb = jk_b b_0 l, \quad (2)$$

где  $k_x = \frac{\text{sh}(jl\sqrt{x_0 b_0})}{jl\sqrt{x_0 b_0}} = \frac{\sin \alpha l}{\alpha l}; \quad (3)$

$$k_b = \frac{2(\text{ch}(jl\sqrt{x_0 b_0}) - 1)}{jl\sqrt{x_0 b_0} \cdot \text{sh}(jl\sqrt{x_0 b_0})} = \frac{2(1 - \cos \alpha l)}{\alpha l \sin \alpha l} = \frac{\text{tg} \frac{\alpha l}{2}}{\frac{\alpha l}{2}}. \quad (4)$$

Простейшие формулы для расчета параметров схемы замещения получаются, если принять

$$\left. \begin{aligned} k_{1x} &= 1; \\ k_{1b} &= 1. \end{aligned} \right\}$$

Разложив в (3)  $\sin \alpha l$  в ряд Маклорена и взяв только два первых члена этого ряда, после преобразований получим известную формулу

$$k_{2x} = 1 - \frac{x_0 b_0}{6} l^2, \quad (6)$$

используемую для расчета параметров воздушных линий длиной до 1000 км.

Если взять три первых члена ряда, то

$$k_{3x} = 1 - \frac{x_0 b_0}{6} l^2 + \frac{x_0^2 b_0^2}{120} l^4 \quad (7)$$

Аналогичным образом поступим при вычислении коэффициента  $k_b$ . Если взять три первых члена ряда разложения  $\cos \alpha l$  и два для  $\sin \alpha l$ , из (4) получим

$$k_{2b} = \frac{1 - \frac{x_0 b_0}{12} l^2}{1 - \frac{x_0 b_0}{6} l^2} \quad (8)$$

Четыре члена ряда разложения  $\cos \alpha l$  и три члена из ряда  $\sin \alpha l$  дают формулу

$$k_{3b} = \frac{1 - \frac{x_0 b_0}{12} l^2 + \frac{x_0^2 b_0^2}{360} l^4}{1 - \frac{x_0 b_0}{6} l^2 + \frac{x_0^2 b_0^2}{120} l^4} \quad (9)$$

Удельные параметры криогенной линии пофазно коаксиальной конструкции определяются по формулам [2]:

$$x_0 = \frac{\omega \mu_0 \mu_u \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi}; \quad b_0 = \frac{2\pi \omega \epsilon_0 \epsilon_u}{\ln \frac{d_2}{d_1}}$$

где  $\mu_0, \mu_u$  - магнитная проницаемость вакуума и электроизоляции;  $\epsilon_0, \epsilon_u$  - электрическая проницаемость вакуума и электроизоляции;  $d_1, d_2$  - внутренний и внешний диаметры коаксиала фазы.

Вычислим произведения  $x_0 b_0$ , входящее в формулы (6) - (9):

$$x_0 b_0 = \omega^2 \mu_0 \mu_u \epsilon_0 \epsilon_u \quad (10)$$

Расчеты показывают, что первичные параметры  $x_0$  и  $b_0$  криогенных линий существенно зависят от номинального напряжения и расчетной мощности линии. Как видно из (10), величина произведения  $x_0 b_0$  от них не зависит. Отсюда следует, что для пофазно коаксиальных конструкций криогенных ли-

ний погрешности расчета параметров схемы замещения не зависят от номинального напряжения, расчетной мощности линии и материала сверхпроводника. Они зависят только от значений величины  $\mu_u$ ,  $\epsilon_u$  и длины линии.

Дадим количественную оценку применимости различных формул.

Для пофазно коаксиальной конструкции сверхпроводящей линии при  $\mu_u = 1$  и  $\epsilon_u = 1$  получены следующие результаты.

Коэффициент  $k_x$ , входящий в расчетную формулу (1), при длинах линий  $l \leq x$  500 км может приниматься  $k_{1x} = 1$ , при этом погрешность по сравнению с вычислением  $k_x$  по (3) составляет менее 5%. При длинах линий  $500 < l \leq 1500$  км для вычисления  $k_x$  можно рекомендовать (6). Расчеты по этой формуле приводят к погрешности по сравнению с формулой (3) менее 1,2% при длинах  $500 < l < 1000$  км и менее 7,8% при длинах  $1000 < l < 1500$  км. Результаты расчетов  $k_x$  по формуле (7) при длинах  $l \leq 2000$  имеют погрешность менее 1%.

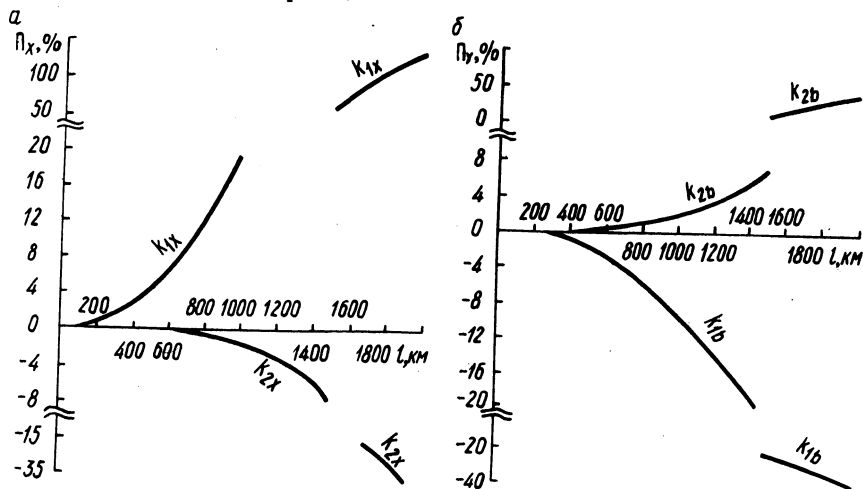


Рис. 1.

Коэффициент  $k_b$  может приниматься  $k_{1b} = 1$  при длинах  $l \leq 800$  км. При этом погрешность по сравнению с расчетом по формуле (4) составляет менее 5,6%. При длинах  $800 < l \leq 1000$  км рекомендуется формула (8), дающая погрешность не более 9,1%. Расчеты  $k_b$  по формуле (9) приводят к погрешности менее 1% при  $l \leq 1500$  км и менее 5% при  $1500 < l \leq 2000$  км.

На рис. 1, а, б приведены зависимости погрешностей расчета  $\Pi_x$  и  $\Pi_b$  параметров схемы замещения  $x$  и  $b$  от длины криогенной линии при расчете их по коэффициентам  $k_{1x}$ ,  $k_{2x}$ ,  $k_{1b}$ ,  $k_{2b}$ . Погрешности вычислялись по формулам (для  $k_x$  и  $k_b$  соответственно):

$$\Pi_x = \frac{k_{ix} - k_x}{k_x} 100 ; \quad \Pi_b = \frac{k_{ib} - k_b}{k_b} 100 ,$$

где  $i = 1, 2$ .

Резюме. Погрешности расчета параметров схем замещения криогенных линий по различным формулам не зависят от номинального напряжения, расчетной мощности и материала сверхпроводника. Определены области применения различных формул для расчета параметров схем замещения криогенных линий.

### Л и т е р а т у р а

1. Электрические системы. Том II. Электрические сети. Под ред. В.А. Веникова. М., 1971. 2. Сверхпроводящие линии электропередачи. Под ред. В.А. Веникова. М., 1971.

УДК 621.316

В.Г. Прокопенко

### УЧЕТ ПОТЕРЬ НА КОРОНУ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 110–750 кВ ПО НАПРЯЖЕНИЮ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Повышением технико-экономических показателей работы электрических сетей энергосистем является учет потерь на корону при планировании характерных режимов сетей 110–750 кВ по напряжению и реактивной мощности. Влияя на регулирующие устройства, располагаемые энергосистемой, можно не только скомпенсировать уравнительные мощности в контурах замкнутой схемы, но и выбрать уровни напряжения, устанавливающие оптимальное соотношение между нагрузочными потерями и потерями на корону при ожидаемых метеорологических условиях.

При составлении на ЭЦВМ программы оптимизации характерных режимов работы сети по напряжению и реактивной мощности, принципиальный алгоритм которой приведен в [1], разработан блок, который позволяет учитывать изменение

потерь на корону в зависимости от напряжения при планировании режимов. Анализ [2, 3] и других работ позволил сделать вывод, что в рабочем диапазоне изменения напряжений на линиях 330 – 750 кВ, характеристики изменения удельных потерь мощности на корону в зависимости от напряжения  $\Delta P_k = f(U)$  допустимо аппроксимировать линейными уравнениями. Например, зависимости для ЛЭП 750 кВ с проводами 4 х АСО-600 [2] имеют вид

$$\Delta P_k = a_i + b_i (U - 750), \quad (1)$$

где  $U_k$  – рабочее напряжение на линии.

Значения коэффициентов  $a_i$ ,  $b_i$  и погрешность аппроксимации приведены в табл. 1.

В расчетной схеме каждая линия или участок (линия может быть разделена на участки для одновременного учета разных метеословий), на которых учитывается зависимость  $\Delta P_k = f(U)$ , задается П-образной схемой замещения. Потери на корону представляются нагрузкой в узлах, которые ограничивают линию или участок, подсчитанной по выражению

$$P_n = 0,5 \Delta P_{kn} l. \quad (2)$$

Здесь  $\Delta P_{kn}$  – удельные потери мощности на корону для некоторого состояния погоды при номинальном напряжении на участке линии  $l$ .

В процессе поиска оптимального решения на каждой итерации, уточняющей значения напряжений узлов, корректируются и значения нагрузок, соответствующих заданным метеословиям и длине линий по формуле

$$\Delta P_{ki} = \frac{a_i + b_i (U - U_n)}{a_i} P_n, \quad (3)$$

Таблица 1

Состояние погоды	$a_i$	$b_i$	Погрешность при напряжениях, %		
			$0,95 U_n$	$1,0 U_n$	$1,05 U_n$
Изморозь	450	3,5	0	4,6	4,7
Снег	170	1,75	5,3	6,2	5,8
Дождь	25,5	0,293	3,5	6,2	4,0
Хорошая погода	7,0	0,074	5,5	0	8,6

где  $a_i$ ,  $b_i$  - численные коэффициенты, характеризующие крутизну зависимости  $\Delta P_k = f(U)$  для  $i$ -го состояния погоды;  $U$ ,  $U_n$  - действительное и номинальное напряжение узла.

По мере корректировки нагрузок, соответствующих потерям на корону, в рабочей ячейке накапливается их сумма, которая после очередной итерации снимается или запоминается в зависимости от того, закончился расчет режима или нет. После расчета режима к значению нагрузочных потерь добавляются потери на корону, и эта сумма вносится в целевую функцию, анализ которой в дальнейшем позволяет сделать вывод: удачен поиск или нет. В разработанном варианте программы одновременно могут учитываться восемь уравнений типа (1). Тип характеристики  $\Delta P_k = f(U)$  для линий указывается с помощью специального индекса, записанного у нагрузки при задании исходных данных.

Расчеты, проведенные на ряде реальных примеров, показали, что учет потерь на корону в значительной степени влияет на результаты оптимизации. При плохих погодных условиях в сетях 750-330 кВ требуется поддерживать пониженное напряжение. Это вызывает небольшое увеличение нагрузочных потерь и значительное снижение потерь на корону. Нагрузочные потери возрастают в линиях 330-750 кВ, а напряжения и потери мощности в сетях 110-220 кВ изменяются мало из-за возможности изменения коэффициентов трансформации трансформаторов и автотрансформаторов связи. Эффект от снижения суммарных потерь мощности в некоторых режимах для исследованных схем составлял 10 МВт и более.

Резюме. Разработана методика учета потерь мощности на корону в оптимизационных расчетах на основе линеаризованных зависимостей  $\Delta P_k = f(U)$ , которая реализована в программе оптимизации режимов работы сетей 110 - 750 кВ по напряжению и реактивной мощности.

Учет потерь на корону в значительной степени влияет на результаты оптимизации. В энергосистемах с развитыми электрическими сетями сверхвысокого напряжения в режимах с неблагоприятными погодными условиями снижение потерь мощности может достигать нескольких десятков МВт.

#### Л и т е р а т у р а

1. Федин В.Т. Методика планирования рационального суточного режима напряжений и потоков реактивной мощности в

энергосистеме. - В сб.: Опыт планирования, анализа потерь энергии и разработки мероприятий по их снижению в энергосистеме. Минск, 1975. 2. Мельников Н.А., Рокотян С.С., Шеренцис А.Н. Проектирование электрической части воздушных линий электропередачи 330-500 кВ. М., 1974. 3. Мельников Н.А., Роддатис В.К., Шеренцис А.Н. Возможности снижения потерь энергии из-за короны на проводах линии 750 кВ путем регулирования напряжения. - В сб.: Дальние электропередачи 750 кВ. Ч. 1. М., 1974.

УДК 621.315

Е.Г. Поспелов

### ОБ УЧЕТЕ КОРОНИРОВАНИЯ ПРОВОДОВ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Для оптимизации режимов линии электропередачи имеют значение сопротивление, проводимость, нагрузка, а также влияние напряжения на потери мощности в шунтирующих сетях. Поэтому важно правильно учесть коронирование проводов при определении параметров линии электропередачи. Имеющиеся методы определения потерь мощности на корону не могут быть использованы для этого учета, так как они базируются на расчете средних удельных потерь мощности на корону для следующих видов погоды: хорошая погода без осадков, сухой снег, изморозь, дождь и мокрый снег. Методы определяют годовые потери энергии на корону по формуле

$$\Delta \mathcal{E}_k = 1 \sum_{n=1}^4 \Delta P_{кп} t_n, \quad (1)$$

где  $\Delta P_{кп}$  - средние удельные потери мощности на корону при определенной погоде продолжительностью  $t_n$ .

Среднегодовые потери мощности на корону при дожде и мокром снеге находятся по потерям энергии, подсчитанным по выражению

$$\Delta \mathcal{E}_d = \sum \Delta P_{ид} t_i, \quad (2)$$

где  $\Delta P_{ид}$ ,  $t_i$  - потери мощности и число часов, соответствующие  $i$ -ой интенсивности дождя и мокрого снега. Тогда среднегодовые потери мощности на корону при дожде и мокром снеге находятся таким образом:



$$\Delta P_{\text{д}} = \frac{\Delta \mathcal{E}_{\text{д}}}{t_{\text{д}}} \quad (3)$$

где  $t_{\text{д}}$  – общая продолжительность дождя и снега.

Для оптимизации режимов линии электропередачи среднегодовые потери мощности на корону не могут быть использованы в качестве исходной информации вследствие значительного изменения величины удельных потерь на корону в зависимости от погоды и ее распределения вдоль трассы линии электропередачи. Для примера приведем результаты измерений потерь на корону на опытно-промышленной электропередаче 750 кВ Конаковская ГЭС – Москва: при среднегодовых удельных потерях 16 – 30 кВт/км удельные потери при плохой погоде составили  $600 \div 800$  кВт/км [1]. Поэтому неправильно проводить оптимизацию режима линии электропередачи по активной проводимости, соответствующей среднегодовым удельным потерям на корону. Активная проводимость должна определяться по потерям, соответствующим моменту и погодным условиям оптимизации. Наибольшие возможности для такого учета имеются при наличии АСУ энергосистемами. Однако для этого необходима также хорошо отработанная методика оценки потерь на корону и соответствующие средства измерения. Это должно быть предметом специальных разработок. При наличии указанных исходных данных потери мощности на коронирование проводов линии электропередачи для рассматриваемого режима могут быть подсчитаны по формуле

$$\Delta P_{\text{к}\Sigma} = \sum_{\text{п}} \Delta P_{\text{кп}} l_{\text{п}}, \quad (4)$$

где  $l_{\text{п}}$  – длина участка линии электропередачи, на котором наблюдается в данном режиме погода и потери мощности на корону  $\Delta P_{\text{кп}}$ . Сумма  $\sum$  берется по всей длине линии.

Возможно также определение активных проводимостей, соответствующих потерям на корону, по участкам линии  $l_{\text{п}}$  с различной погодой и последующим последовательным сложением всех участков для получения эквивалентных параметров линии электропередачи.

Коронирование проводов приводит к изменению емкости линии. Величина этого изменения может быть подсчитана по формулам [2]. Для электропередачи 750 кВ при удельных потерях на корону  $\Delta P_{\text{к}} = 600$  кВт/км увеличение емкостной проводимости получилось  $\Delta b = 0,54 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{км}}$ , что составило примерно 12% от емкостной проводимости линии

без короны. Для электропередач 750 и 1150 кВ желательно в каждом конкретном случае в зависимости от ожидаемой величины потерь на корону проверить необходимость учета этих потерь при определении реактивной проводимости линии электропередачи.

Резюме. Предлагается методика определения потерь на корону при оптимизации установившихся режимов линий электропередачи с учетом момента и погодных условий оптимизации.

### Л и т е р а т у р а

1. Левитов В.И., Попков В.И. Методика расчетной оценки уровня потерь мощности и энергии на корону на проводах ЛЭП сверхвысокого напряжения. – "Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт", 1968, № 1. 2. Левитов В.И. Корона переменного тока. М., 1975.

УДК 621.315.1

С.Н. Иванова, Е.П. Гончарик, канд. техн. наук

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТОКОВ, СТЕКАЮЩИХ С АВТОМОБИЛЕЙ НА ЗЕМЛЮ, В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В работе предлагается приближенный метод расчета токов замыкания на землю корпуса автомобилей, сельхозтехники и других объектов значительных размеров, обусловленных электростатическими влияниями воздушных линий (ВЛ). Особенностью метода является то, что реальный объект заменяется цилиндром, длина которого равна длине объекта. Радиус цилиндра находится следующим образом.

В зоне влияния ВЛ сверхвысокого напряжения (СВН) в пределах габаритов машин электрическое поле близко к равномерному. Известно, что поверхностная плотность зарядов, индуцированных на проводящем теле, в равномерном поле пропорциональна напряженности этого поля. Реальный объект (автомобиль и пр.) и эквивалентный ему цилиндр по размерам соизмеримы, а по форме схожи. Поэтому можно предположить, что коэффициенты пропорциональности для этих двух тел будут близки, а индуцированные заряды по их поверхностям распределяются с примерно одинаковой плотностью. Из условия эквивалентности полный заряд на этих телах должен быть оди-

наков. Следовательно, площади проводящей поверхности реального объекта и эквивалентного ему цилиндра должны быть примерно одинаковыми

$$S \approx 2\pi r l + 2\pi r^2,$$

где  $S$  - площадь проводящей поверхности реального объекта;  $l$  - длина цилиндра (объекта);  $r$  - радиус цилиндра.

По физической природе радиус цилиндра не может быть отрицательным, поэтому

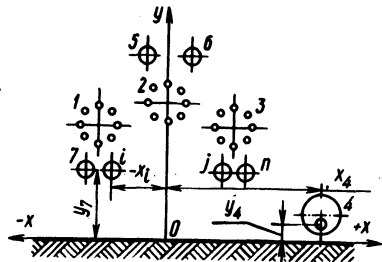
$$r = \sqrt{\frac{l^2}{4} - \frac{S}{2\pi} - \frac{l}{2}}.$$

Заряд цилиндра находим из решения системы уравнений

$$\begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \vdots \\ \varphi_i \\ \vdots \\ \varphi_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1j} & \dots & \alpha_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{i1} & \alpha_{i2} & \dots & \alpha_{ij} & \dots & \alpha_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \dots & \alpha_{nj} & \dots & \alpha_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_i \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{pmatrix},$$

где  $\varphi_i$ ,  $\dot{q}_i$  - потенциал и заряд  $i$ -го провода (комплекс);  $\alpha_{ij}$  - собственные ( $i = j$ ) и взаимные ( $i \neq j$ ) потенциальные коэффициенты на единицу длины, нахождение которых сводится к определению геометрических расстояний между проводами линии, цилиндром (объектом) и их зеркальными изображениями. Для проводов и тросов ВЛ из-за малости их диаметров эти расстояния отсчитываются от геометрической оси. Поиск расстояний между проводами и объектом усложняется ввиду значительных размеров последнего и может быть проведен по методике [1].

Рис. 1. Схема расположения проводов и тросов: 1-3 - фазные провода; 4 - объект (автомобиль), 5, 6 - грозозащитные тросы, 7 -  $i, j, n$  - экранирующие тросы.



Поскольку решение алгебраической системы уравнений целесообразно выполнять на ЦВМ, можно рекомендовать задать положение системы "провода - объект" в координатах  $x$  и  $y$  (рис. 1). Тогда потенциальные коэффициенты системы проводов определяются по формулам единой структуры

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{l} \cdot 18 \cdot 10^9 \ln \frac{2y_i}{r_i} \quad \text{при } i = j ;$$

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{l} \cdot 18 \cdot 10^9 \ln \sqrt{\frac{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} \quad \text{при } i \neq j .$$

Здесь  $r_i$  - радиус фазных проводов, тросов;  $i, j$  - текущие номера строки и столбца матрицы потенциальных коэффициентов;  $l$  - длина цилиндра.

Указанный прием намного сокращает объем программы, время счета, а главное, делает программу универсальной, пригодной для любого числа проводов, ограничиваемого памятью машины. Положение оси ординат в общем случае произвольное.

Сопоставление рассчитанного по изложенной методике тока

$$I = \omega q l$$

с экспериментальными значениями, получаемыми под ВЛ 330 кВ для 10 типов автомобилей, дает основание рассматривать предложенный метод приемлемым для инженерных расчетов. Измеренные значения токов отличались от расчетных в основном не более чем на 20% (рис. 2).

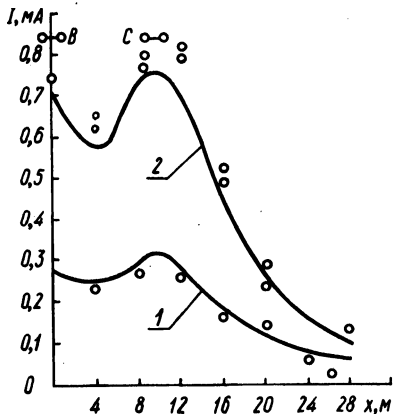


Рис. 2. Сопоставление расчетного (сплошные линии) и измеренного (отдельные точки) тока замыкания на землю корпуса автомобиля ЗАЗ-966 (1) и автолаборатории на базе ГАЗ-51 (2) под ВЛ 330 кВ: 1 - экранный трос подвешен только под одной фазой С; 2 - тросы подвешены под крайними фазами А и С.

Для ориентировочных оценок может быть использован еще более упрощенный способ, основанный на том, что поверхностная плотность зарядов, индуцированных на проводящих телах, находящихся в равномерном поле, пропорциональна напряженности этого поля. Поскольку напряженность поля вблизи ВЛ СВН в пределах габаритов машин близка к равномерной, полный заряд  $Q$  на проводящем теле (автомобиле,

сельхозтехнике и пр.) будет определяться напряженностью электрического поля  $E$  и поверхностью тела  $S$ .

$$\text{Тогда } I = \omega Q = KES,$$

где  $K$  — эмпирический коэффициент, найденный путем расчетов  $I$  и  $E$  и экспериментально проверенный для различных марок автомобилей под ВЛ 330 кВ. Результаты многочисленных расчетов и измерений показали, что для разного рода автомобилей и цилиндров различных размеров под ВЛ различного класса напряжения значение  $K$  изменяется в пределах 0,003 — 0,0036 и для ориентировочных оценок может быть принят равным 0,00322 мА/кВ · м.

Резюме. Зная напряженность электрического поля, которая всегда рассчитывается при проектировании ВЛ СВН, можно оценить величину тока, стекающего на землю с того или иного механизма, находящегося в этом поле, и иметь представление об уровне электробезопасности.

#### Л и т е р а т у р а

1. Гончарик Е.П. Напряжения, индуцированные на транспорте в электрическом поле ВЛ. — "Электричество", 1974, № 5.

УДК 621.311.1

Л.П. Падалко, канд. техн. наук, В.Н. Нагорнов

#### О ПРИНЦИПАХ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

В связи с усиливающимся разуплотнением графиков электрической нагрузки энергосистем [1, 2] проблема выбора оптимального соотношения между базовыми и маневренными генерирующими источниками становится особо острой. Экономическая сторона проблемы объясняется различием стоимостных характеристик источников различного типа (удельных капиталовложений и удельных расходов топлива) [1]. Рассматривая в качестве пиковых источников газотурбинные установки (ГТУ), полупиковых — паротурбинные электростанции, оборудованные агрегатами с докритическими параметрами пара, и базовых — мощные КЭС, оборудованные агрегатами мощностью 300, 500, 800, 1200 мВт, и АЭС, для этих показателей можно записать соотношения

$$k_{\text{б}} > k_{\text{пп}} > k_{\text{п}} ; \quad b_{\text{б}} < b_{\text{пп}} < b_{\text{п}} ,$$

где  $k_{\text{б}}$ ,  $k_{\text{пп}}$ ,  $k_{\text{п}}$  - удельные капитальные вложения в соответствующие источники;  $b_{\text{б}}$ ,  $b_{\text{пп}}$ ,  $b_{\text{п}}$  - удельный расход топлива в источниках соответствующего типа.

Требования технического характера обуславливаются неравномерным режимом электропотребления, который предъявляет повышенные требования к маневренным свойствам оборудования: скорости набора и сброса нагрузки, глубине разгрузки.

В настоящее время энергосистемы недостаточно оборудованы маневренными энергоисточниками. Это приводит к тому, что мощное блочное оборудование работает в переменной части графика электрической нагрузки, из-за чего в свою очередь происходит повреждение оборудования вследствие частых остановок и пусков, а также снижение экономичности его работы [3]. Необходимо иметь в составе энергосистемы высокоманевренное оборудование, способное работать в полупиковой и пиковой зонах графика нагрузки.

В наиболее полной постановке задачи для покрытия пиковой мощности следовало бы предусмотреть, помимо газотурбинных установок, также пиковую мощность ТЭЦ. Последняя позволяет обеспечить не только частичное покрытие пиковой части графика нагрузки, но и прохождение базовыми электростанциями ночного провала нагрузки [4]. В данной статье приводится упрощенная постановка задачи - без учета ТЭЦ.

В качестве критерия оптимальности принимая условие минимума приведенных затрат, целевую функцию можно записать.

$$Z = p_{\text{б}} k_{\text{б}} x_{\text{б}} + p_{\text{пп}} k_{\text{пп}} x_{\text{пп}} + p_{\text{п}} k_{\text{п}} x_{\text{п}} + c_{\text{б}} b_{\text{б}} x_{\text{б}} h_{\text{б}} + c_{\text{пп}} b_{\text{пп}} x_{\text{пп}} h_{\text{пп}} + c_{\text{п}} b_{\text{п}} x_{\text{п}} h_{\text{п}} ,$$

где  $x_{\text{б}}$ ,  $x_{\text{пп}}$ ,  $x_{\text{п}}$  - установленные мощности, соответственно базовых, полупиковых и пиковых электростанций;  $k_{\text{б}}$ ,  $k_{\text{пп}}$ ,  $k_{\text{п}}$  - удельные капитальные вложения соответственно в базовые, полупиковые и пиковые электростанции;  $c_{\text{б}}$ ,  $c_{\text{пп}}$ ,  $c_{\text{п}}$  - замыкающие затраты на топливо, используемое на базовых, полупиковых и пиковых источниках;  $b_{\text{б}}$ ,  $b_{\text{пп}}$ ,  $b_{\text{п}}$  - удельные расходы топлива у соответствующих энергоисточников;  $h_{\text{б}}$ ,  $h_{\text{пп}}$ ,  $h_{\text{п}}$  - числа часов использования установленной мощности соответствующих источников;  $p$  - коэффициент, учитывающий отчисления на амортизацию, обслуживание, а также нормативный коэффициент эффективности.

В составе ограничений задачи следует учесть:  
условие баланса мощностей

$$x_{\text{б}} + x_{\text{пп}} + x_{\text{п}} = P$$

и условие баланса энергии

$$x_{\text{б}} h_{\text{б}} + x_{\text{пп}} h_{\text{пп}} + x_{\text{п}} h_{\text{п}} = \Theta.$$

Принципиальные основы решения сформулированной задачи поясним для случая, когда годовой режим электропотребления может быть представлен с помощью одного характерного суточного графика электрической нагрузки. Схема решения задачи состоит из двух этапов. На первом этапе рассматривается задача отыскания оптимального соотношения между базовыми и полупиковыми источниками, а на втором – между полупиковыми и пиковыми источниками.

На первом этапе предполагается, что график нагрузки будет покрываться только за счет сооружения генерирующих мощностей двух типов: базовых и полупиковых. Для решения задачи вводятся функции  $h_{\text{б}} = h_{\text{б}}(x_{\text{б}})$  и  $h_{\text{пп}} = h_{\text{пп}}(x_{\text{пп}})$ , представляющие собой зависимость числа часов использования установленной мощности соответствующих источников от их мощности. Эти зависимости нетрудно получить, зная характерный суточный график электрической нагрузки и режим экономического использования генерирующей мощности соответствующего типа. Так как за основу задачи принимаются только соображения экономического характера, то при заданных соотношениях мощностей различных типов базовая мощность всегда будет использоваться на максимальную величину, в то время как полупиковая мощность будет покрывать оставшуюся часть графика электрической нагрузки.

На первом этапе задача формируется следующим образом:

$$\min \left\{ p_{\text{бк}} x_{\text{б}} + p_{\text{ппк}} x_{\text{пп}} + c_{\text{бб}} b_{\text{бб}} x_{\text{б}} h_{\text{б}}(x_{\text{б}}) + c_{\text{ппп}} b_{\text{ппп}} x_{\text{пп}} h_{\text{пп}}(x_{\text{пп}}) \right\};$$

$$x_{\text{б}} + x_{\text{пп}} = P.$$

Ограничения по балансу энергии не записываются, так как введение функций  $h_{\text{б}}(x_{\text{б}})$  и  $h_{\text{пп}}(x_{\text{пп}})$  обеспечивает при заданных  $x_{\text{б}}$  и  $x_{\text{пп}}$  выработку требуемого количества энергии.

Составив функцию Лагранжа, возьмем производные по  $x_{\text{б}}$  и  $x_{\text{пп}}$  и, приравняв их к нулю, получим систему уравнений

$$p_{\text{бк}} + c_{\text{бб}} b_{\text{бб}} \left( h_{\text{б}} + x_{\text{б}} \frac{dh_{\text{б}}}{dx_{\text{б}}} \right) + \lambda = 0;$$

$$p_{\text{пп}} k_{\text{пп}} + c_{\text{пп}} b_{\text{пп}} \left( h_{\text{пп}} + x_{\text{пп}} \frac{dh_{\text{пп}}}{dx_{\text{пп}}} \right) + \lambda = 0,$$

решение которой совместно с уравнениями баланса дает иско-  
мые решения  $x_{\text{б}}$  и  $x_{\text{пп}}$ .

На втором этапе, зафиксировав полученное значение базовой мощности, ставим задачу

$$\min \left\{ p_{\text{пп}} k_{\text{пп}} x_{\text{пп}} + p_{\text{п}} k_{\text{п}} x_{\text{п}} + c_{\text{пп}} b_{\text{пп}} x_{\text{пп}} h_{\text{пп}}(x_{\text{пп}}) + c_{\text{п}} b_{\text{п}} x_{\text{п}} h_{\text{п}}(x_{\text{п}}) \right\};$$

$$x_{\text{пп}} + x_{\text{п}} = P',$$

где  $P'$  - та часть максимальной нагрузки, которая остается после вписывания в график базовой нагрузки ( $P' = P - x_{\text{б}}$ ).

Решение данной задачи осуществляется аналогично решению предыдущей задачи.

Для учета реального годового режима энергопотребления системы (т.е. реального участия электростанций различных типов в покрытии графиков нагрузки в годовом разрезе) следует представить модель электропотребления в виде не одного, а нескольких характерных суточных графиков нагрузки. Такими могут быть графики рабочих, субботних и воскресных суток, взятые по каждому месяцу года. Но в этом случае модель была бы слишком подробной для рассматриваемой задачи. Считается целесообразным ее некоторое упрощение, например представление годового режима энергопотребления суточными графиками зимнего и летнего сезонов. Если каждый из сезонов представляется одним характерным суточным графиком, то математическая модель выбора структуры генерирующих мощностей может быть записана так:

$$\min Z = p_{\text{б}} k_{\text{б}} x_{\text{б}} + p_{\text{пп}} k_{\text{пп}} x_{\text{пп}} + p_{\text{п}} k_{\text{п}} x_{\text{п}} + c_{\text{б}} b_{\text{б}} x_{\text{б}} h_{\text{б}} + c_{\text{пп}} b_{\text{пп}} x_{\text{пп}} h_{\text{пп}} +$$

$$+ c_{\text{п}} b_{\text{п}} x_{\text{п}} h_{\text{п}} + c_{\text{б}}' b_{\text{б}}' x_{\text{б}}' h_{\text{б}}' + c_{\text{пп}}' b_{\text{пп}}' x_{\text{пп}}' h_{\text{пп}}' + c_{\text{п}}' b_{\text{п}}' x_{\text{п}}' h_{\text{п}}';$$

$$x_{\text{б}} + x_{\text{пп}} + x_{\text{п}} = P_{\text{з}}; \quad x_{\text{б}}' + x_{\text{пп}}' + x_{\text{п}}' = P_{\text{л}};$$

$$x_{\text{б}} h_{\text{б}} + x_{\text{пп}} h_{\text{пп}} + x_{\text{п}} h_{\text{п}} = \mathcal{E}_{\text{з}}; \quad x_{\text{б}}' h_{\text{б}}' + x_{\text{пп}}' h_{\text{пп}}' + x_{\text{п}}' h_{\text{п}}' = \mathcal{E}_{\text{л}};$$

$$x_{\text{б}}' \leq x_{\text{б}}; \quad x_{\text{пп}}' \leq x_{\text{пп}}; \quad x_{\text{п}}' \leq x_{\text{п}}.$$

Здесь  $P_{\text{з}}$ ,  $P_{\text{л}}$  - максимум суточных графиков соответственно зимнего и летнего сезонов;  $\mathcal{E}_{\text{з}}$ ,  $\mathcal{E}_{\text{л}}$  - потребное количество энергии соответственно в зимнем и летнем периодах;  $x_{\text{б}}'$ ,  $x_{\text{пп}}'$ ,  $x_{\text{п}}'$  - рабочие мощности соответственно базовых, полупиковых и пиковых источников в летний период.



Данная задача, как и предыдущая, должна решаться с помощью двухэтапного метода.

В статье задача рассматривалась в статической постановке. Учитывая наблюдаемую в последние годы тенденцию разуплотнения суточного графика нагрузки, предложенная модель может быть использована для решения рассматриваемой задачи в наиболее общей, динамической постановке. При этом частный оптимум, полученный для каждого года, будет соответствовать оптимальному решению для всего расчетного периода оптимизации.

Расчеты, выполненные по изложенной методике для одной из энергосистем на уровень нагрузки 1985 г., показали, что соотношение между базовыми, полупиковыми и пиковыми мощностями должно быть соответственно 74,2, 16,1 и 9,7%.

Резюме. Изложенный в статье подход позволяет экономически обоснованно подойти к выбору оптимального соотношения между базовыми и маневренными генерирующими источниками в энергосистеме.

#### Л и т е р а т у р а

1. Мелентьев Л.А., Лаврененко К.Д. О выборе эффективного оборудования для работы в переменной части графика нагрузки электроэнергетических систем. - "Теплоэнергетика", 1971, № 3.
2. Рокотян С.С., Волькенау И.М., Волкова Е.А. Требования энергосистем к маневренности оборудования. - "Теплоэнергетика", 1971, № 3.
3. Озарной И.Н. Формирование структуры генерирующих мощностей. - "Электрические станции", 1972, № 6.
4. Гельтман А.Э., Шапиро Н.И. Анализ эффективности использования ТЭЦ для покрытия пиковых электрических нагрузок. - "Теплоэнергетика", 1968, № 2.

УДК 621.311.16.014

В.В. Петров, канд. техн. наук, Р.И. Белоусова

#### РАСЧЕТ КОРРЕКЦИИ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Режим энергосистемы может отклоняться от предварительного рассчитанного суточного графика нагрузки. При этом могут нарушаться ограничения по режиму работы оборудования и ка-

честву электроэнергии отпускаемому потребителям. Своевременная коррекция режима энергосистемы в течение всего процесса снизит вероятность возникновения или развития аварии и аварийных отключений в энергосистеме.

В качестве режимных контролируемых параметров решаемой задачи рассматриваются: модули напряжений в узлах сети  $U_i$ ; модули токов в линиях ( $I_{ij}$ ); модули разности фазовых углов напряжений между любыми узлами сети ( $\theta_{ij}$ ).

Ввод контролируемых параметров в заданные границы обеспечивается вариацией регулирующих величин: коэффициентов трансформации трансформаторов, регулируемых под нагрузкой  $\tau_{ij}$ , активной  $P_i$  и реактивной  $Q_i$  мощностью источников генерации.

При нарушении контролируемых параметров режима энергосистемы проводится оперативная коррекция по критерию минимума корректирующих воздействий с учетом регулировочного диапазона контролируемых параметров и регулирующих величин:

$$P_{\gamma}^{\min} \leq \Delta P_{\gamma} + P_{\gamma}^{\circ} \leq P_{\gamma}^{\max}; \quad Q_{\rho}^{\min} \leq \Delta Q_{\rho} + Q_{\rho}^{\circ} \leq Q_{\rho}^{\max}; \quad (1)$$

$$(\tau_{ij})_{g}^{\min} \leq (\Delta \tau_{ij})_g + (\tau_{ij})_g^{\circ} \leq (\tau_{ij})_g^{\max};$$

$$U_i^{\min} \leq \Delta U_i + U_i^{\circ} \leq U_i^{\max}; \quad (2)$$

$$-I_{ij}^{\max} \leq \Delta I_{ij} + I_{ij}^{\circ} \leq I_{ij}^{\max};$$

$$-\theta_{ij}^{\max} \leq \Delta \theta_{ij} + \theta_{ij}^{\circ} \leq \theta_{ij}^{\max}.$$

где  $\Delta P_{\gamma}$ ,  $\Delta Q_{\rho}$ ,  $(\Delta \tau_{ij})_g$  - соответственно приращения активной, реактивной мощности источников генерации и коэффициентов трансформации трансформаторов, регулируемых под нагрузкой (РПН);  $\gamma$ ,  $\rho$ ,  $g$  - количество станций, регулирующих соответственно активную, реактивную мощность и количество регулируемых под нагрузкой трансформаторов.

Поставленная задача может быть решена методом линейного программирования [1]

$$\min \left\{ C^T x \mid Ax = b, x \geq 0 \right\},$$

где  $C$  - вектор коэффициентов целевой функции;  $b$  - вектор свободных членов;  $A$  - матрица коэффициентов чувствительности;  $x$  - искомый вектор.

Использование метода линейного программирования требует представление информации в канонической форме. При этом ограничения, заданные в виде системы двусторонних неравенств, преобразуются в уравнения с положительными переменными путем введения дополнительных переменных. Методика преобразования неравенств в равенства приведена в [2]. В рассматриваемой задаче неравенства (1), (2) представлены в виде:

$$\begin{aligned}
 x_{\nu} - x_{2\nu} - x[2(\nu + \rho + g) + \nu] &= P_{\nu}^{\min} - P_{\nu}^0; \\
 x_{2\nu} - x_{\nu} - x_{2(\nu + \rho)} &= P_{\nu}^0 - P_{\nu}^{\max}; \\
 -M_{\rho}^u x_{\nu} + M_{\rho}^u x_{2\nu} - M_{Q}^u x(2\nu + \rho) + M_{Q}^u x_{2(\nu + \rho)} - \\
 -M_{\tau}^u x(2\nu + 2\rho + g) + M_{\tau}^u x_{2(\nu + \rho + g)} - x_{6(\nu + \rho + g)} &= \\
 = -U_i^{\max} + U_i^0; \\
 M_{\rho}^u x_{\nu} - M_{\rho}^u x_{2\nu} + M_{Q}^u x(2\nu + \rho) - M_{Q}^u x_{2(\nu + \rho)} + \\
 + M_{\tau}^u x(2\nu + 2\rho + g) - M_{\tau}^u x_{2(\nu + \rho + g)} - \\
 -x[6(\nu + \rho + g) + \alpha] &= -U_i^{\min} - U_i^0,
 \end{aligned}$$

где  $M_{\rho}^u$ ,  $M_{Q}^u$ ,  $M_{\tau}^u$  - матрицы чувствительности напряжений к вариации соответственно активной, реактивной мощности и коэффициентов трансформации трансформаторов с РПН.

Сформированная в канонической форме задача может быть решена методом линейного программирования. Стандартные программы [3], реализующие метод линейного программирования, требуют больших затрат машинного времени, что неприемлемо для решения оперативных задач. Кроме того, специфика задачи оперативной коррекции режима энергосистемы состоит в том, что только относительно небольшая часть контролируемых параметров одновременно выходит за пределы заданных ограничений.

Учитывая особенности данной задачи, разработан алгоритм расчета оптимальных корректирующих воздействий, позволяющий ввести нарушенные контролируемые параметры в область заданных ограничений с максимальной скоростью. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 1.

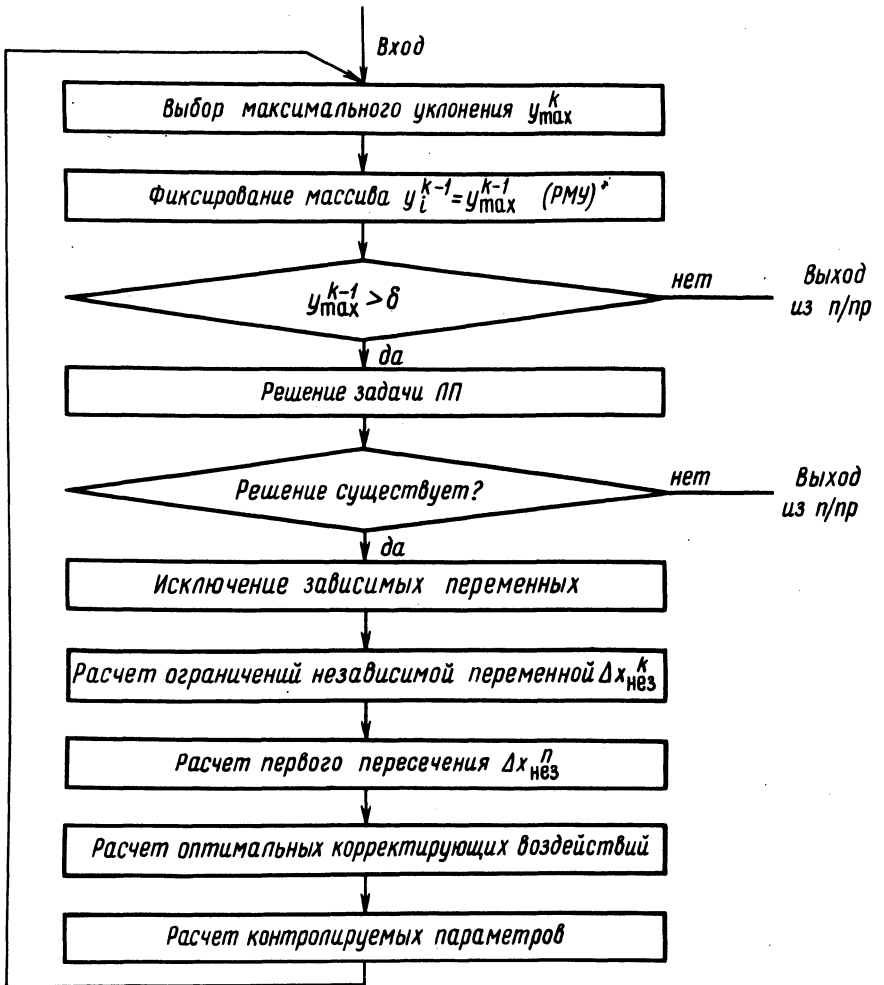


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета корректирующих воздействий.

Суть алгоритма состоит в том, что из всего множества контролируемых параметров выбираются нарушенные параметры с равным максимальным отклонением от граничной области. Уравнения, описывающие массив равных максимальных отклонений (РМУ), решаются методом линейного программирования при условии отсутствия ограничений на переменные. При наличии решения проводится исключение зависимых переменных и формирование массива РМУ как функции одной произвольно выбранной независимой переменной. Если выбранная независимая переменная имеет свободный регулировочный диапазон, рассчитывается значение ее приращения в точке пересечения с одним из отклонений. Зная приращение независимой переменной, рассчитываются оптимальные корректирующие воздействия, а затем и контролируемые параметры энергосистемы. Расчет, таким образом, повторяется до тех пор, пока нарушенные контролируемые параметры не будут введены в область заданных режимных ограничений или все регулировочные диапазоны независимых переменных не будут исчерпаны.

Разработанная методика, алгоритм и программа оперативного ввода контролируемых параметров в область заданных ограничений позволяют получить на каждом шаге итерации приближение к оптимальному решению по всем контролируемым параметрам и значительно сократить время поиска решения. Для энергосистемы размерностью 100 узлов решение задачи линейного программирования на машине ЕС-1030 занимает примерно 45 . . . 70 мин [3]. Если в рассматриваемой системе количество нарушенных параметров не превышает 10 . . . 20, то применение предлагаемого алгоритма позволит сократить время счета в 5 . . . 7 раз.

Резюме. Представляется возможность в любой момент времени получать решение задачи, близкое к оптимальному, и использовать его для цели оперативного управления.

### Л и т е р а т у р а

1. Белоусова Р.И. Методика ускоренного расчета послеаварийного режима энергосистемы. - "Изв. вузов СССР. Энергетика", 1974, № 5.
2. Мякишева Е.Д. Стандартная программа для решения задачи линейного программирования на машине БЭСМ-4, сер.: Стандартные программы решения задач математического программирования, вып. 9. М., 1968.
3. Математическое обеспечение ЕС ЭВМ, вып. 5. Система линейного программирования. Минск, 1974.

Е.В. Калентионок, канд. техн. наук,  
В.А. Файбисович

## ОСОБЕННОСТИ ПРОТЕКАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В АВАРИЙНЫХ УСЛОВИЯХ

Для обеспечения живучести энергосистем и предотвращения развития аварий при возникновении значительных дефицитов мощности отделяют часть электростанции с ее собственными нуждами и примерно сбалансированной нагрузкой прилегающих к электростанции районов энергосистемы. Предполагается, что поставленная задача может быть успешно решена путем использования противоаварийной автоматики, выполняющей указанную операцию при достаточно глубоком снижении частоты в течение некоторого времени [1].

Для проверки указанных положений при разработке подобной автоматики для одной из станций Белорусской энергосистемы были исследованы аварийные процессы в системе собственных нужд станции в различных системных условиях. Исследование выполнялось путем расчета возникающих при аварии электромеханических переходных процессов на ЦВМ "БЭСМ-4" с использованием программы расчета динамической устойчивости сложных энергосистем (№ 1У-4). Анализ режимных условий показал, что возможны два пути развития аварии: при большом дефиците активной мощности; при большом дефиците как активной, так и реактивной мощности.

Если в первом случае предлагаемый в [1] алгоритм автоматики предотвращает развитие аварии, то во втором случае этого не происходит. На рис. 1 представлены результаты расчета переходного процесса, имеющего место при одновременном возникновении дефицита активной и реактивной мощности. В начале аварии имеет место снижение напряжения и частоты. Но скорость снижения напряжения значительно выше, чем скорость снижения частоты, и уровни напряжения быстро снижаются до критических значений, вызывая затормаживание асинхронных двигателей собственных нужд станции. После срабатывания форсировки на регуляторах возбуждения генераторов происходят взаимопротивоположные процессы роста генерирующей и увеличения потребляемой мощности затормаживающихся асинхронных двигателей. При этом напряжение несколько увеличивается, но не настолько, чтобы задержать

процесс "опрокидывания" двигателей, вызывающий рост потребляемой реактивной мощности и дальнейшее снижение напряжения.

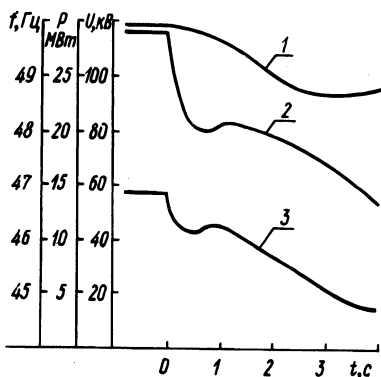


Рис. 1. Переходной процесс на станции при дефиците мощности в энергосистеме: 1 — изменение частоты; 2 — изменение напряжения на шинах 110 кВ; 3 — изменение активной мощности собственных нужд блока.

Необходимо также учитывать, что при торможении асинхронных двигателей в зоне закритических скольжений у последних снижается потребление активной мощности, что приводит к уменьшению небаланса активной мощности, стабилизации частоты и даже ее увеличению (рис. 1). Промедление в выделении собственных нужд в этом случае может привести к погашению станции технологическими защитами теплосилового оборудования из-за резкого снижения производительности механизмов собственных нужд. Поэтому для делительности автоматики станции наряду с факторами снижения частоты, характеризующими дефицит активной мощности, необходимо использовать параметры, которые характеризуют и большие дефициты реактивной мощности, приводящие к нарушению устойчивой работы собственных нужд станции. Как показывает анализ переходных процессов в системе собственных нужд, такими параметрами режима могут быть одновременное снижение напряжения и непрерывное уменьшение активной мощности собственных нужд ( $\frac{dP}{dt} < 0$ ) в течение 0,5 - 1,0 с.

Используя полученные результаты, производственное предприятие "Белэнергоремналадка" разрабатывает автоматику отделения одного блока Березовской ГРЭС с собственными нуждами всех блоков станции. Автоматика должна действовать при возникновении больших дефицитов мощности в энергосистеме. Автоматика, при построении которой для повышения надежности и улучшения технических характеристик широко использо-

ваны интегральные логические схемы и полупроводниковые операционные усилители, будет введена в работу в 1977 г.

Резюме. При построении автоматической схемы отделения собственных нужд тепловых станций необходимо учитывать возможность возникновения как "лавины частоты", так и "лавины напряжения" и особенности поведения асинхронных двигателей собственных нужд в условиях одновременного снижения частоты и напряжения.

### Л и т е р а т у р а

1. Методические указания по автоматической частотной разгрузке. М., 1972.

УДК 621.315.1

О.В. Фальковский

### ОСНОВНАЯ КОНЦЕПЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ (АСП) С УЧЕТОМ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСЕТЕВЫХ ОБЪЕКТОВ

Возможности использования средств вычислительной техники в проектировании электроэнергетических объектов в основном определяются степенью формализации отдельных проектных задач и всего процесса проектирования, а также характеристиками технических средств.

Процесс автоматизации проектирования, начавшийся с появлением ЭВМ первого поколения, сначала выражался в решении отдельных инженерно-экономических задач и внедрении их в практику.

Несмотря на значительное количество программ, они охватывают лишь наиболее массовые расчеты отдельных разрозненных задач. Некоторые программы дублируют решение одних и тех же задач, но выполнены по различным алгоритмам.

В целом процесс проектирования состоит из ряда элементов творческого, расчетного и графического характера. При ручном проектировании строгой согласованности проведения работ не придается существенного значения. При этом отсутствуют обратные связи между отдельными этапами проектирования, т.е. решение, принятое на каждом из последующих этапов проектирования, не предполагает уточнения решений, принятых на предыдущих этапах.



Например, в самом общем виде процесс проектирования линии электропередачи можно представить укрупненной блок-схемой (рис. 1), на которой указаны следующие виды работ: 1 - изыскания; 2 - электрические расчеты, релейная защита и противоаварийная автоматика; 3 - технологическая часть проекта; 4 - строительная часть проекта; 5 - средства связи и защита линий связи от влияния ВЛ; 6 - сметы.

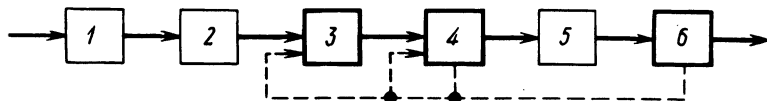


Рис. 1. Укрупненная блок-схема проектирования.

Таким образом, технологический процесс проектирования в большинстве случаев однонаправленный и поэтому не всегда оптимальный. Оптимальность принятых решений по проекту в основном определяется опытом и интуицией проектировщика.

При решении отдельных задач проекта обратные связи имеют место, но глубина этих связей недостаточна, чтобы повлиять существенно на экономические показатели проекта. Использование вычислительной техники только для решения отдельных проектных задач сыграло положительную роль, повысив производительность труда проектировщиков. Однако существенно повлиять на производительность труда, а тем более на качество принимаемых решений не сумели по следующим причинам:

- 1) отсутствовала необходимая техническая база и средства реализации (мощной операционной системы);
- 2) разработанные программы охватывали лишь небольшие части проекта, не имея общей информационной базы по проекту в целом. Организация информационной связи между программами (отдельными технологическими блоками) оставалась функцией проектировщика;
- 3) невозможность реализации в схеме проектирования оптимизационного алгоритма, требующего достаточного объема оперативной памяти и эффективных внешних устройств прямого доступа.

Дальнейшее наращивание числа программ, решающих локальные задачи проекта вне связи с системой, технически и экономически нецелесообразно.

Анализ результатов первого этапа использования ЭВМ в проектировании и накопленный опыт заложили фундамент для

перехода от решения отдельных задач к разработке систем проектирования электроэнергетических объектов.

При разработке АСП одним из важнейших вопросов является выбор такой методологии автоматизированного проектирования, которая обеспечила бы высокую эффективность принимаемых решений и (или) возможность управления технологическим процессом проектирования.

Системный подход к решению проблемы автоматизации проектирования является той методологией, которая позволяет разработать и увязать в единый комплекс средства, обеспечивающие успех автоматизации проектирования: полный алгоритм проектирования; развитое математическое обеспечение; единое информационное обеспечение, мощное техническое обеспечение; единое организационное обеспечение.

Основная концепция системы состоит в том, что необходимо создать набор технологически связанных блоков, имеющих единую информационную базу, который реализует оптимальный технологический процесс проектирования. Для этого необходимо определить этапы проектирования, существенно влияющие на оптимизируемые параметры, и охватить их обратной связью в виде информации об оценках качества этих параметров.

Таковыми оценками могут быть: капитальные затраты, материалоемкость, технологичность.

Естественно, данный перечень показателей качества не является исчерпывающим.

Этапами проектирования, которые подлежат охвату обратной связью, в случае проектирования линии электропередачи являются: технологическая и строительная части проекта, сметы.

Обратные связи блок-схемы изображены на рис. 1 штриховыми линиями.

Меняя систему параметров и критериев, проектировщик может управлять процессом. Поэтому при наличии обратных связей становится возможным выбор более рациональной стратегии решения.

Применение вычислительной техники в процессе проектирования позволяет использовать богатый арсенал экономико-математических методов:

- а) логический синтез сетевых моделей технологического процесса;
- б) формальный метод синтеза структурных схем алгоритмов с логическими и арифметическими операторами;

в) методы математического, в частности динамического программирования.

В этом случае процесс проектирования становится качественно другим, так как в распоряжении проектировщика появляется инструмент, который в корне меняет технологию проектирования. Труд проектировщика становится более творческим и, следовательно, более эффективным.

**Резюме.** С внедрением АСП необходима выработка методологии, которая должна предусматривать строгую последовательность работ, охваченных обратными связями с целью обеспечения высокой эффективности принимаемых решений, и возможность управления технологическим процессом проектирования с использованием богатого арсенала экономико-математических методов.

УДК 621.311:681.325

Т.Г. Поспелова, канд. техн. наук,  
Р.И. Запатрин, канд. техн. наук

## НЕКОТОРЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ПОСТРОЕНИЮ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АСУ ЭНЕРГОСИСТЕМАМИ

Важнейшими элементами информационного обеспечения АСУ энергосистемами служат входящая в информационную базу информационная модель объекта управления, информационно-поисковая система и обслуживающие программы для формирования рабочих массивов, контроля информации и т.д. Информационная база представляет собой совокупность показателей и документов, используемых в системе документооборота, массивов информации, образующих архивы, а также методов их организации, хранения и контроля. Не следует отождествлять понятие информационной базы с понятием банка данных. Банк данных служит для централизации обработки информации и, не охватывая методов организации, хранения и контроля информации, является составной частью информационной базы. Сформулированное определение информационной базы показывает, что это – важнейшая функциональная часть АСУ, необходимая для централизации управления энергосистемами.

Группа массивов в информационной базе носит сравнительно устойчивый, постоянный характер и называется норматив-

но-справочным фондом. Большая же часть архивов массивов требует неперменной замены устаревшей информации новой, отражающей происшедшие изменения как в объекте управления, так и в методах управления им.

Взаимодействие пользователей АСУ с архивами данных осуществляется через информационно-поисковую систему. С увеличением числа пользователей и количества решаемых задач резко растет объем информации, затрудняется система поиска, теряется универсальность алгоритмов системы управления.

В связи с этим можно указать на следующие актуальные задачи, возникающие при организации информационного обеспечения: поиск рациональных способов размещения и компоновки информации в памяти ЭВМ; обеспечение способности информационной базы к обновлению и самовосстановлению.

В данной работе предлагаются два варианта решения этих задач: топологическое представление информации в памяти ЭВМ, т.е. представление в виде  $n$ -мерных массивов и придание трансляторам способности изменять информационную базу с точки зрения методов организации, хранения, контроля информации, а также информационно-поисковую систему в зависимости от числа пользователей и старения информации.

При указанном способе представления информации по каждой из осей координат задается дискретный ряд, определяющий закон отыскания нужной  $i$ -й координаты по признакам заданного кода поиска. Причем на одной оси можно размещать информацию о нескольких параметрах  $j$ -го элемента управляемого объекта энергосистемы. Переход от  $n$ -мерного пространства к одномерному (при восприятии заказов транслятором) и обратный переход при формировании ответов осуществимы на основе уравнений спектральной теории симметричных линейных операторов.

Совокупность массивов в информационной базе, описывающих полностью текущее состояние энергосистемы, отражающих изменение всех ее параметров и связей между ними, образует информационную модель энергосистемы. Последняя состоит из связанных между собой потоками входной и выходной информации информационных моделей, которые отражают состояние основных структурных элементов энергосистемы. Составление информационных моделей, на наш взгляд, может значительно облегчить предварительно разработанные схемы потоков информации, циркулирующих между различными уровнями авто-

матической системы диспетчерского управления (АСДУ). После составления схем исходя из структуры проблемного математического обеспечения и состояния информационной техники можно определять объем, состав информации на каждом иерархическом уровне и формировать ее в  $n$ -мерные массивы по тем или иным признакам.

Резюме. Исследование структуры и задач организации информационного обеспечения АСУ энергосистемами позволили предложить следующие способы их решения: представление информации в памяти ЭВМ в виде  $n$ -мерных массивов и придание трансляторам особых свойств.

УДК 621.311.019.9

В.С. Урбанович

### АЛГОРИТМ ВВОДА И КОРРЕКТИРОВКИ МАССИВОВ НОРМАТИВНО-СПРАВОЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ НА МД ПО ЭЛЕКТРОСЕТЕВОМУ ОБОРУДОВАНИЮ

Большой объем информации при решении комплекса задач планирования капитальных ремонтов электросетевого оборудования определяет необходимость формирования массивов нормативно-справочной информации (НСИ) на внешних запоминающих устройствах (ВЗУ) для долгосрочного хранения на магнитных лентах (МЛ) и магнитных дисках (МД). С целью сокращения времени поиска необходимой информации используются ВЗУ с прямым доступом (МД), в которых каждая физическая запись имеет свой адрес, по которому обеспечивается непосредственный (прямой) доступ к каждой отдельной записи. Содержание массивов информации, размещенных на МД, необходимо постоянно приводить в соответствие с теми изменениями, которые происходят с планируемым оборудованием (ввод в эксплуатацию нового оборудования, реконструкция, демонтаж старого оборудования), показатели которого представлены в массивах информации.

В общем случае процесс ввода и корректировки массивов информации складывается из следующих процедур: ввод информации в память ЭВМ; контроль правильности информации; формирование рабочих массивов на МД, удобных для машинной обработки; корректировка массивов НСИ.

Ввод информации в ЭВМ и ее контроль не вызывают затруднений при использовании дисковой операционной системы

(ДОС) ЭВМ ЕС. Сложнее реализуется процесс формирования рабочих массивов на МД и корректировка уже созданных массивов. Это обуславливается тем, что время, требуемое для выбора и перезаписи информации, так называемый цикл памяти, на МД существенно отличается от цикла памяти ЭВМ. Так, например, процесс сортировки массива информации, расположенного в памяти ЭВМ, может быть реализован простым алгоритмом за приемлемый промежуток времени. Аналогичный алгоритм сортировки массива информации, расположенной на МД, потребует значительно больших затрат машинного времени. Использование стандартных программ ДОС ЕС для сортировки и корректировки информации на МД связано с трудностью увязки этих программ с программами потребителя.

Для устранения указанных недостатков предлагается алгоритм ввода и корректировки рабочих массивов НСИ на МД (блок-схема алгоритма приведена на рис. 1). Согласно этому алгоритму предусматривается создание рабочих массивов на МД с резервированием на них участков для занесения управляющих строк (код РЭУ, ПЭС, оборудования). Управляющие строки формируются в процессе первоначального ввода НСИ и служат для определения номера корректируемой записи или места добавления строк информации в рабочий массив.

В памяти ЭВМ создаются промежуточные массивы для временного хранения вводимой информации и формирования управляющих строк. Размер промежуточного массива для временного хранения вводимой информации может быть выбран оптимальным образом в зависимости от величины корректируемого рабочего массива на МД. Размеры промежуточных массивов для управляющих строк должны быть не менее максимального числа записей, зарезервированных на МД для рабочего массива НСИ.

Алгоритмом предусмотрены следующие виды корректировки рабочего массива: добавление строк информации; удаление строк информации; изменение отдельных показателей.

Добавление строк информации представляет собой процесс расширения рабочего массива за счет добавления новых строк в определенное место или за последней записью массива НСИ. Все записи, которые должны быть помещены внутри рабочего массива, заносятся в промежуточный массив ЭВМ для временного хранения вводимой информации. Место вставок новых строк информации определяется по управляющим строкам промежуточного массива.

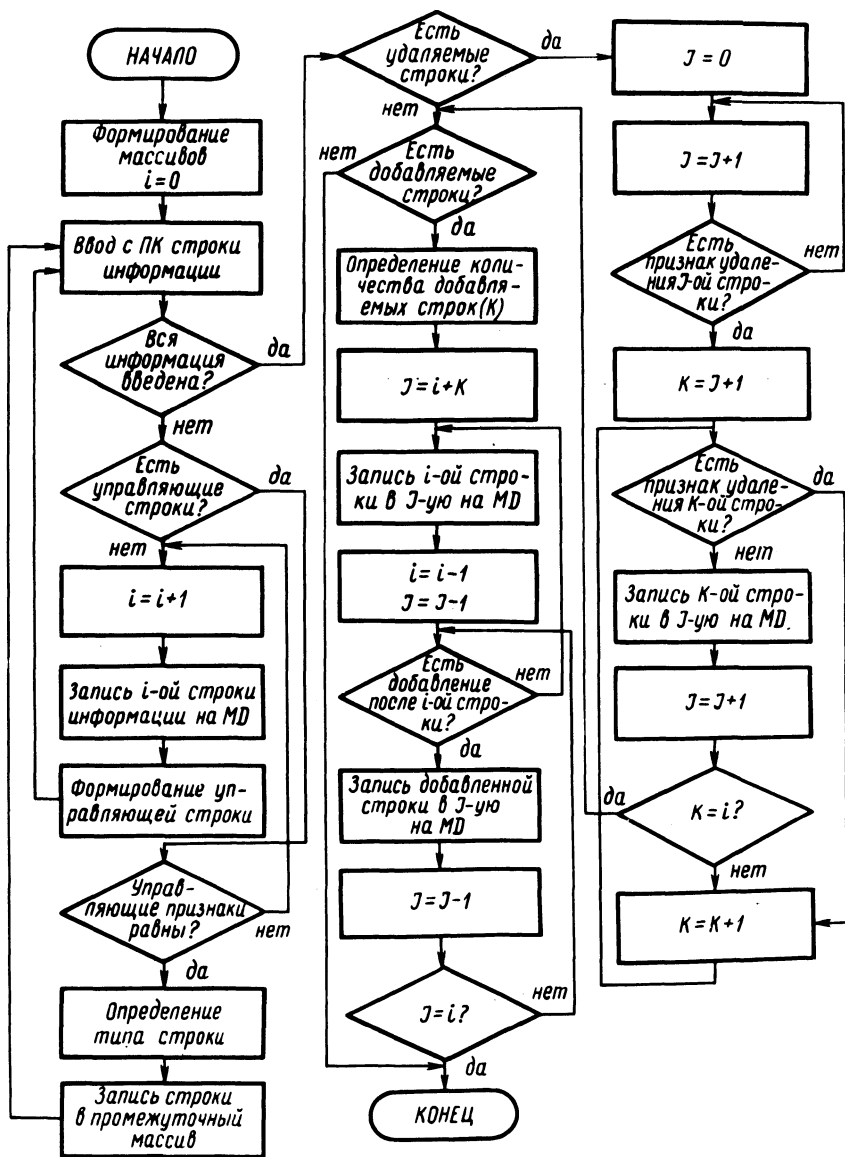


Рис. 1. Блок-схема алгоритма ввода и корректировки массивов НСИ на MD.

Если записи должны быть удалены, то в промежуточный массив заносятся признак удаления и управляющий признак, по которому может быть определен номер удаляемой строки.

При необходимости изменения отдельного показателя строки рабочего массива по управляющему признаку отыскивается номер записи на МД этой строки и производится замена нужного показателя.

Отсюда следует, что промежуточный рабочий массив используется только при удалении и добавлении строк внутри рабочего массива. Количество добавленных или удаленных строк ограничено величиной промежуточного рабочего массива. При переполнении промежуточного массива или считывании признака конца информации управление передается на выполнение задания корректировки рабочего массива.

Процесс корректировки рабочего массива может быть осуществлен двумя способами. Первый заключается в том, что за один просмотр рабочего массива осуществляется как добавление, так и исключение строк информации. Во втором случае осуществляется два шага задания: удаление строк информации, добавление строк информации. Первый способ более сложный в программной реализации. Количество добавленных или удаленных строк будет зависеть не от размера промежуточного массива, а от количества строк удаления. На каждую удаляющую строку в промежуточном массиве должна быть зарезервирована дополнительная строка, так как может произойти перекрытие записей на МД. Второй способ более прост в программной реализации (блок-схема алгоритма приведена на рис. 1) и дает возможность полностью использовать промежуточный массив, но требует больших затрат машинного времени, так как выполняется два просмотра НСИ.

Резюме. По предложенному алгоритму разработана программа (язык ФОРТРАН IV) с использованием ДОС ЕС, которая применяется для корректировки массивов НСИ в условиях функционирования АСУ энергосистемы, и в частности при решении комплексов задач планирования ремонтов электрических сетей и оборудования.





При аналитическом описании геометрии дуги с учетом поперечных размеров принято следующее допущение. Считаем, что сечение бруска лежит своей большей осью в плоскости  $Y' O' Z'$  (рис. 1). Такое допущение не учитывает поворота криволинейной части стержня вокруг своей оси.

Будем рассматривать криволинейную часть дуги для верхнего и нижнего слоя в системе координат  $X' Y' Z'$ , а прямолинейные участки на выходе стержней из паза, головки стержней и их соединения - в системе  $X Y Z$ .

Пусть I, II точки в системе координат  $X' Y' Z'$  определяют отрезок, лежащий на оси бруска, а  $x'_I, y'_I, z'_I, x'_II, y'_II, z'_II$  - координаты этих точек.

Координаты точек D и E, лежащих на оси  $v$  сечения и отстоящих от точки I на расстояние, равное половине высоты  $h$  сечения стержня, определяются из выражений (1) и (2), полученных на основании уравнений прямой, проходящей через точки I - II и прямой, проходящей через точку I перпендикулярно первой

$$\left. \begin{aligned} (y'_I - y'_D)^2 + (z'_I - z'_D)^2 &= \frac{h^2}{4} ; \\ z'_D &= -\frac{y'_{II} - y'_I}{z'_{II} - z'_I} y'_D + \frac{y'_{II} - y'_I}{z'_{II} - z'_I} y'_I + z'_I ; \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\left. \begin{aligned} y'_D &= \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} ; \\ y'_E &= \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} ; \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} z'_D &= -\frac{y'_{II} - y'_I}{z'_{II} - z'_I} (y'_D - y'_I) + z'_I ; \end{aligned} \right\} (2)$$

$$z'_E = -\frac{y'_{II} - y'_I}{z'_{II} - z'_I} (y'_E - y'_I) + z'_I ,$$

$$\text{где } A = 1 + \left( \frac{y'_{II} - y'_I}{z'_{II} - z'_I} \right)^2 ;$$

$$B = -2y_1'^2 - 2 \left( \frac{y_{II}' - y_I'}{z_{II}' - z_I'} \right)^2 y_1' ;$$

$$C = y_1' \left[ 1 + \left( \frac{y_{II}' - y_I'}{z_{II}' - z_I'} \right)^2 \right] - \frac{h^2}{4} .$$

Эти точки являются проекциями на плоскость  $Z' O' y_1'$  точек 1, 4 и 2, 3 сечения стержня. Для того чтобы получить координаты этих точек в системе  $X' y_1' Z'$ , необходимо задать для них координату  $x_1'$ , для точек 1 и 2 -  $\frac{s}{2}$ , для 3, 4 -  $-\frac{s}{2}$  ( $s$  - ширина сечения стержня).

Аналогично рассуждая, можно получить координаты точек 5, 6, 7, 8 второго сечения бруска. Также можно определить координаты точек участка криволинейной части дуги нижнего слоя.

Чтобы перейти к основной системе координат  $X Y Z$ , необходимо произвести преобразование координат по известным выражениям.

Прямые участки лобовой дуги рассматривались в системе координат  $X Y Z$ . Координаты точки 1 первого сечения головки стержня верхнего слоя определяются по выражением (3).

$$x_1 = x_1 + \frac{h}{2} \sin \varphi + \frac{s}{2} \cos \varphi ; y_1 = y_1 - \frac{h}{2} \cos \varphi + \frac{s}{2} \sin \varphi ; z_1 = z_1 , \quad (3)$$

где  $\varphi = \frac{\pi b}{a}$ ;  $b$  - шаг обмотки по пазам;  $a$  - число пазов статора; точка 1 - первая точка отрезка I - II оси бруска головки стержня верхнего слоя. Подобным образом определяются координаты точек 2, 3, 4 сечения.

Несложно получить координаты точек второго сечения бруска, подставляя координаты точки II отрезка I - II. Аналогично определяются граничные точки брусков остальных прямолинейных участков дуги.

Для того чтобы получить координаты сечения любого другого стержня лобовой части, необходимо осуществить поворот системы координат  $X Y Z$  относительно оси  $Z$  на соответствующий угол.

Резюме. Приведенный аналитический способ описания геометрии лобовой дуги дает возможность производить расчеты э.д.у. в лобовой части турбогенераторов с учетом поперечных размеров сечения стержней обмотки на ЭЦВМ.

### Л и т е р а т у р а

1. Рудкий А.И., Стрелюк М.И., Губанович А.Г. Расчет электродинамических усилий в лобовых частях генераторов. - "Изв. вузов СССР. Энергетика", 1976, № 6.

УДК 621.316.925

### Е.В. Глинский, А.А. Тишечкин, канд. техн. наук МЕТОДИКА ВЫБОРА УСТАВОК ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ПОНИЖАЮЩИХ ДВУХОБМОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ЦВМ

Расчеты дифзащит производятся в основном с применением простейших расчетных устройств [1] и требуют больших затрат времени и квалифицированного труда. Существующие машинные программы расчета [2] имеют ограниченные возможности и составлены применительно к ЦВМ второго поколения, которые сейчас заменяются машинами третьего поколения.

С ростом мощностей энергосистем существенно увеличивается не только объем вычислительных работ по расчету токов короткого замыкания и уставок релейных защит, но и возрастают требования к качеству проводимых расчетов, срокам их выполнения. Существенное сокращение затрат времени и квалифицированного труда, а также повышение качества расчетов может быть достигнуто путем разработки и внедрения программ, обеспечивающих автоматизацию расчетов релейных защит с помощью ЭЦВМ вычислительных центров энергосистем.

В работе рассматривается алгоритм и его программная реализация применительно к использованию в комплексной программе эксплуатационных расчетов дифзащит понижающих трансформаторов с помощью ЦВМ серии "ЕС".

В программе производится расчет токов короткого замыкания и выбор уставок дифзащит с реле РНТ-565, РНТ-566/2, РНТ-566, ДЗТ-11, ДЗТ-11/3.

В качестве исходной информации для расчетов служат: данные о питающих системах; межсистемных связях и синхронных компенсаторах; количество трансформаторов на подстанции и

технические данные каждого трансформатора; коэффициенты трансформации трансформаторов тока и схемы их соединения.

Расчет токов короткого замыкания производится в соответствии с расчетной схемой подстанции, учитывающей различные варианты подключения любого реально возможного числа двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов (автотрансформаторов). Расчет токов выполняется для максимальных и минимальных режимов с учетом особенностей трансформаторов с РПН, влияния синхронных компенсаторов и включает расчет сопротивлений трансформаторов и формирование расчетных схем для максимального и минимального режимов работы.

Блок-схема алгоритма выбора уставок приведена на рис. 1. Алгоритм разработан для любых схем соединений обмоток силового трансформатора. При разработке алгоритма было учтено, что вследствие непрерывного роста мощностей энергосистем и соответственно уровней токов короткого замыкания периодически возникает необходимость в уточнении параметров защит, находящихся в эксплуатации. В процессе уточнения может выявиться потребность в изменении типа реле, а следовательно, расчет должен сопровождаться выбором оптимального типа реле.

В программе тип реле, принимаемый к расчету, определяется константой КР, величина которой задается в исходной информации. Если задано  $КР = 0$ , то производится выбор типа реле РНТ или ДЗТ. Первоначально рассчитывается дифзащита с реле РНТ. Если по каким-либо причинам (недостаточная чувствительность, расчетное число витков не может быть набрано на реле и т.д.) реле РНТ не может быть принято к установке, то продолжается расчет дифзащиты с реле ДЗТ. В программе предусмотрена возможность выбирать только тип реле ДЗТ, минуя расчет с реле РНТ. В этом случае в исходной информации задается  $КР = 1$ .

В случае, когда производится расчет дифзащиты с заданным типом реле и требования, предъявляемые к защите, полностью не удовлетворяются, то производится печать результатов расчета, вычисляется  $КР = 0$  и расчет продолжается с целью выбора оптимального типа реле.

Расчет токов срабатывания, выбор числа витков обмоток насыщающегося трансформатора реле производится в соответствии с рекомендациями [1, 3]. Для реле РНТ-566, РНТ-566/2, ДЗТ-11/3 выполняется проверка обмоток реле на термическую стойкость.



Выбор числа витков тормозной обмотки, включаемой со стороны низшего напряжения трансформатора, производится с учетом того обстоятельства, что при небольших рабочих намагничивающих силах (н. с.) действительная характеристика реле значительно отличается от спрямляющей касательной и пользование последней приводит к выбору завышенного числа витков тормозной обмотки. Поэтому при малых рабочих н. с. выбор витков тормозной обмотки производится по действительной характеристике реле, соответствующей минимальному торможению, которая аппроксимировалась двумя отрезками прямой.

Программа выбора уставок дифзащит понижающих трансформаторов составлена на алгоритмическом языке ФОРТРАН IV применительно к ЦВМ серии "ЕС". Максимальное время, необходимое для выполнения одного расчета двухобмоточного трансформатора, не превышает 1,5 - 2 мин для ЦВМ "ЕС-1020".

В настоящее время программа находится в опытно-промышленной эксплуатации в ЦСРЗА Белглавэнерго.

Резюме. Разработанная программа может использоваться как для эксплуатационных расчетов дифзащит, так и для расчетов дифзащит на стадии их проектирования.

#### Л и т е р а т у р а

1. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. Л., 1976. 2. Шверин Н.Г. Расчет уставок и выбор реле токовых защит двухобмоточных трансформаторов при помощи ЭВМ "Наири". - "Электрические станции", 1975, № 5. 3. Руководящие указания по релейной защите. Защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов, вып. 4. М. - Л., 1962.

УДК 621.316.925

Л.Н. Свита

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДИФФАЗНОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЗАЩИТЫ С РАСПОЛОЖЕНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОРГАНОВ ПОД РАБОЧИМ ПОТЕНЦИАЛОМ ЛЭП

Дифференциально-фазные высокочастотные защиты (ДФЗ) являются быстродействующими и предназначаются в качестве

основных защит от всех видов повреждений ЛЭП напряжением 110 кВ и выше.

В настоящей статье рассматривается исследование ДФЗ с размещением информационных органов под рабочим потенциалом ЛЭП [1, 2].

Проверка работоспособности ДФЗ производилась применительно к ЛЭП 750 кВ средней длины порядка 300 – 400 км. На данном этапе работы исследовалось поведение защиты при однофазных коротких замыканиях (к. з.) в различных точках защищаемой линии и вне ее при учете периодических составляющих тока к. з. основной частоты и аperiodических составляющих. Исследование проводилось методом математического моделирования с воспроизведением комплексных математических моделей защит на ЦВМ при заданных параметрах режима линии.

Расчеты производились для схемы энергосистемы, содержащей ЛЭП 750 кВ, приведенной на рис. 1. Периодические составляющие токов к. з. определялись расчетным путем на ЦВМ с помощью математической модели при условии постоянства э. д. с. питающих систем по концам линии с учетом токов нагрузки предшествующего режима. Э. д. с. питающих систем, принимаются в режиме к. з. такими же, как в предшествующем нормальном режиме [3].

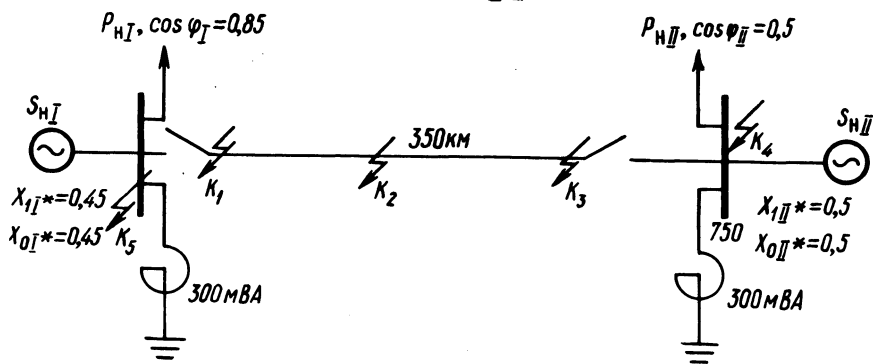


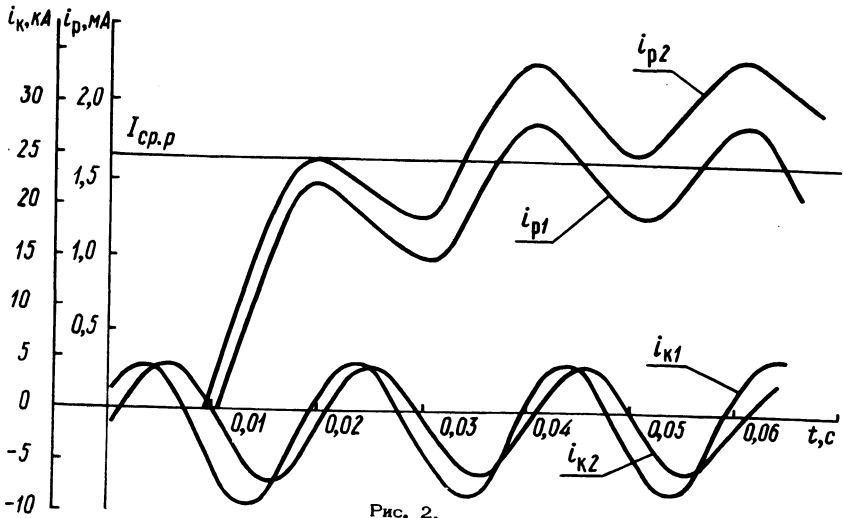
Рис. 1.

При возникновении к. з. появляются аperiodические составляющие тока, так как при внезапном изменении сопротивления цепи, которая содержит индуктивное и активное сопротивление, ток не может мгновенно изменить свою величину и постепенно переходит от предшествующего значения нормального режима к своему новому значению. В соответствии с за-



Таблица 1

Мес- то пов- реж- де- ния	В начале ЛЭП			В конце ЛЭП		
	периодическая составляющая тока		начальное значение аperiodической составляющей тока	периодическая составляющая тока		начальное значение аperiodической составляющей тока
	к, э,	фаза, радиан	к, э., А	к, э,	фаза, радиан	к, э., А
	амплитудное значение, А			амплитудное значение, А		
K <sub>1</sub>	19200	0,495	-11861	2335	-0,192	461,8
K <sub>2</sub>	4560	0,565	-2509	3440	-0,124	475,1
K <sub>3</sub>	2860	0,545	1143	12700	0,075	2463
K <sub>4</sub>	2565	0,336	843	12850	3,28	4794
K <sub>5</sub>	18500	3,53	8014	2340	-0,075	1925



коном инерции магнитного потока можно записать, что мгновенное значение тока нового режима равно току предшествующего режима (в момент возникновения к. з.)

$$i_{\text{раб}} = \sqrt{2} I_{\text{раб}} \sin (\omega_0 t + \alpha + \psi_{\text{раб}}) ; \quad (1)$$

$$i_k = \sqrt{2} I_{\text{пк}} \sin \left( \omega_0 t + \alpha + \psi_k \right) + I_{\text{ae}} \frac{t}{T}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  - угол включения.

Для момента времени  $t = 0$

$$I_a = - \left[ \sqrt{2} I_{\text{пк}} \sin (\alpha + \psi_k) - \sqrt{2} I_{\text{раб}} \sin (\alpha + \psi_{\text{раб}}) \right]. \quad (3)$$

Величины и начальные фазы периодических составляющих, начальные значения аperiodических составляющих токов однофазного к. з. при передаваемой мощности 2 000 МВт в конце линии приведены в табл. 1.

Сдвиг фаз между токами по концам линии в поврежденной фазе составляет  $35 - 50^\circ$  и  $155 - 210^\circ$  - в неповрежденных фазах. Значения токов в неповрежденных фазах остаются близкими к нормальному режиму.

В качестве примера на рис. 2 приведены кривые изменения токов к.з. и токов в исполнительном поляризованном реле при к.з. в защищаемой зоне (точка  $K_1$ ). Защита надежно работает при к.з. в защищаемой зоне. При внешних к.з. токи в исполнительном реле достигают величины 1 мА, что значительно меньше тока срабатывания реле.

Резюме. Предлагаемая защита будет правильно и надежно работать при различных видах к.з. в защищаемой ЛЭП и обладать высоким быстродействием.

#### Л и т е р а т у р а

1. Новаш В.И., Свита Л.Н. Устройство для дифференциально-фазной высокочастотной защиты линии электропередачи. Авт. свид. № 521627. - "Бюл. изобр.", 1976, № 26.
2. Новаш В.И., Стрелюк М.И., Свита Л.Н. К методике исследования диффазной высокочастотной защиты с размещением информационных органов под рабочим потенциалом ЛЭП.- В сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики, вып. 3. Минск, 1976.
3. Новаш В.И., Стрелюк М.И., Свита Л.Н. Расчет установившегося режима дальних линий электропередач сверхвысокого напряжения с помощью ЭЦВМ. - В сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики, вып. 3. Минск, 1976.

## О ПРОГНОЗИРОВАНИИ НАДЕЖНОСТИ

Современная теория надежности применяется для решения разнообразных задач: начиная с оценки надежности производственных систем и кончая вопросами разработки стратегии их обслуживания с помощью прогнозирования показателей надежности в конкретных условиях эксплуатации. Последние используются для обоснования периодичности профилактики оборудования с целью поддержания надежности системы на заданном уровне [1].

Существуют различные подходы и методы решения задач надежности, которые основаны на разных моделях отказов. Для установления сроков вывода выключателя в ремонт могут быть использованы модели отказов по износу [2]. Так, модель равномерного износа заключается в том, что процесс сработки ресурса надежности рассматривается как последовательность  $(N + 1)$  состояний элемента от начального  $E_N$  с ресурсом  $N$  до состояния отказа  $E_0$  - при полной сработке ресурса. Считают, что переходы возможны только от каждого предыдущего состояния  $E_{k+1}$  к последующему  $E_k$ , и при этом срабатывается  $\frac{1}{N}$  доля ресурса, т.е. на эту долю снижается ресурс элемента по износу. Диаграмма переходов, отвечающая модели с равномерным износом, представлена на рис. 1, а. Тогда время сработки ресурса зависит от параметра потока воздействий, изнашивающих выключатель  $\lambda_1$ , т.е. потока отключений (коротких замыканий на данном присоединении).

Вероятность безотказной работы выключателя  $R_1(t)$  по износу за время  $t$  можно найти как сумму вероятностей  $P_k(t)$  событий  $E_k$  при  $1 \leq k \leq N$ . Формула имеет вид

$$R_1(t) = \sum_{k=1}^N P_k(t) = 1 - \int_0^t \frac{1}{\Gamma(N)} e^{-\lambda_1 x} \lambda_1^{N-1} x^{N-1} dx =$$

$$= 1 - P_x^2(\tau, 2N),$$

$$\text{где } \Gamma(N) = \int_0^{\infty} x^{N-1} e^{-x} dx; \quad \tau = 2\lambda_1 t;$$

$P_{\lambda_1}^2(\tau, 2N)$  - интегральная функция распределения "хи-квадрат".

Модель равномерного износа можно применить к трансформаторным и секционными выключателям. Выключатели, установленные на воздушных линиях передач, коммутируют различные режимы коротких замыканий. Чем тяжелее режим, тем большая доля ресурса срабатывает при его отключении. По степени загрязнения масла при горении дуги в зависимости от времени коммутации и мощности короткого замыкания выделяют 3 вида коммутаций на ЛЭП: 1) к.з. с током  $0,3 \div 0,6$  от предельного – сработка  $\frac{1}{N}$  ресурса (расчетный по степени загрязнения масла); 2) к.з. с предельным током – сработка  $\frac{2}{N}$  ресурса; 3) неудаленные к.з. с высокой частотой восстанавливающегося напряжения – сработка  $\frac{5}{N}$  ресурса (в 5 раз тяжелее расчетного).

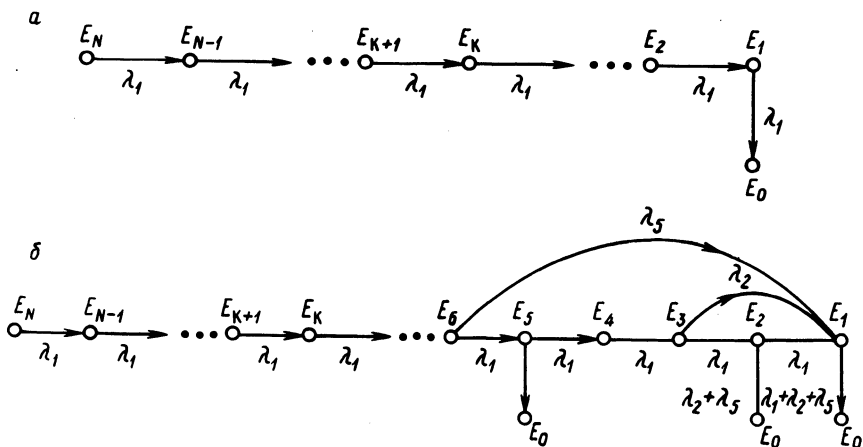


Рис. 1. Диаграмма переходов для модели отказов с равномерным (а) и неравномерным (б) износом.

Это означает, что если ресурс выключателя  $N$ , то он может быть сработан или за  $N_1 = N$  отключений 1-го вида или за  $N_2 = \frac{N}{2}$  отключений 2-го вида или за  $N_5 = \frac{N}{5}$  отключений 3-го вида, т.е.

$$N = N_1 = 2 N_2 = 5 N_5 .$$

По типу дугогасительной системы современные выключатели имеют ресурс 20 отключений.

Диаграмма переходов для такой модели неравномерного износа представлена на рис. 1, б. Здесь интенсивности соот-

ветствующих переходов зависят от параметров потока коммутаций.

Вероятность отсутствия отказов по износу для этой модели вычисляется так:

$$R_{\text{из}}(t) = \sum_{k=1}^N P_k(t).$$

$$\text{Здесь } P_N(t) = e^{-\lambda_{\Sigma} t}; \quad P_{N-1}(t) = \lambda_1 e^{-\lambda_{\Sigma} t};$$

$$P_{N-2}(t) = \left( \frac{\lambda_1^2 t^2}{2!} + \lambda_2 t \right) e^{-\lambda_{\Sigma} t};$$

$$P_{N-3}(t) = \left( \frac{\lambda_1^3 t^3}{3!} + \frac{\lambda_1 \lambda_2 t^2}{2!} + \lambda_3 t \right) e^{-\lambda_{\Sigma} t} \text{ и т.д.};$$

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{j=1}^N \lambda_j.$$

В условиях эксплуатации вместо начального ресурса  $N$  надо подставить располагаемый ресурс

$$n = N - (n_1 + 2n_2 + 5n_5) = N - n_{\text{из}},$$

где  $n_{\text{из}}$  - сработанная доля ресурса, если выключатель число коротких замыканий соответственно отключил  $n_1$ ,  $n_2$  и  $n_5$ , 1-го, 2-го и 3-го видов.

Для  $n > 20$  формула, приведенная в [3], вычисления вероятностей безотказной работы выключателя по износу при неравномерной сработке ресурса на предстоящее время  $t$  работы имеет вид

$$k \leq \frac{n-1}{5} \quad p < \frac{n-1-5k}{2} \quad n-1-5k-2p$$

$$R_{\text{из}}(t) = \sum_{k=0} \sum_{p=0} \sum_{m=0} \frac{(\lambda_5 t)^k}{k!} e^{-5t} \cdot \frac{(\lambda_2 t)^p}{p!} e^{-2t} \cdot \frac{(\lambda_1 t)^m}{m!} e^{-\lambda_1 t}$$

Показатель фактического уровня надежности  $R(t)$  представляет собой вероятность совмещения отсутствия за время  $t$  начальных отказов  $R_{\text{нач}}(t)$ , внезапных (чисто случайных) отказов  $R_0(t)$  и отказов по износу  $R_{\text{из}}(t)$ .

Формула для него имеет вид

$$R(t) = R_{\text{нач}}(t) R_o(t) R_{\text{из}}(t) ,$$

где  $R_{\text{нач}}(t) = \alpha$ ;  $R_o(t) = e^{-\lambda_o t}$ ;  $\lambda_o = \text{const}$  .

Если вычисленное значение  $R(t)$  получится ниже заданного уровня надежности, то следует выключатель вывести во внеочередной ремонт, после которого его располагаемый ресурс восстановится до  $n = N$  .

Резюме. Кроме общепринятой модели экспоненциального закона надежности весьма плодотворными в энергетике являются модель отказов с равномерным износом и модель отказов по износу при неравномерной сработке ресурса. Они позволяют прогнозировать надежность выключателей, установленных на конкретных присоединениях в различных условиях эксплуатации.

#### Л и т е р а т у р а

1. Окорочков В.Р. Надежность производственных систем. Л., 1972. 2. Гук Ю.Б., Казак М.А., Мясников А.В. Теория и расчет надежности систем электроснабжения. М., 1970. 3. Гук Ю.Б., Зейлидзон Е.Д., Манов Н.А. О применении основных понятий и критериев теории надежности в релейной защите. - Электрические станции, 1967, № 8.

УДК 621.316

М.И. Травянский

#### ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ 6 кВ

Количество трансформаторных подстанций (ТП) городской электрической сети непрерывно возрастает. Ежегодно примерно шестая часть ТП подвергается капитальному ремонту, четвертая - текущему. Кроме того, в межремонтный период возможны аварийные ремонты того или иного оборудования ТП. Некоторые виды оборудования ТП ремонтируются в сроки, соответствующие их физическому износу. В условиях эксплуатации важно предвидеть количество возможных аварийных отключений того или иного оборудования, оценить значения удельной повреждаемости отдельных элементов сети, найти

средние значения наработки на отказ того оборудования, ремонт которого производится по мере необходимости. Знание вероятностных характеристик надежности работы позволит обеспечить качественное текущее и перспективное планирование ремонтов и их материальное обеспечение. Трансформаторные подстанции городской сети состоят из  $n_{ij}$  видов оборудования. Здесь  $i = 1, 2, \dots, N$  - количество групп оборудования  $j$ -го вида ( $j = 1, 2, \dots, M$ ). Например, силовые трансформаторы ( $j$ -й вид) можно группировать в  $i$  групп по их номинальной мощности.

В дальнейшем мы будем рассматривать группы оборудования в пределах одного вида.

Вероятность аварийного простоя оборудования в течение года [1]

$$q_i^{ав} = \frac{t_{авi}}{8760} = \frac{\lambda_i \bar{t}_{авi}}{8760}, \quad (1)$$

где  $t_{авi}$  - длительность производства аварийных ремонтов единицы  $i$ -го оборудования в течение года, ч;  $\lambda_i$  - удельная повреждаемость оборудования,  $\frac{\text{повр.}}{\text{ед.год}}$ ;  $\bar{t}_{авi}$  - среднее время производства одного аварийного ремонта, ч.

Значение  $\lambda_i$  определится как

$$\lambda_i = \frac{\alpha_i}{T n_i}, \quad (2)$$

где  $\alpha_i$  - количество аварий с оборудованием  $i$ -й группы;  $T$  - период наблюдения, лет.

Вероятность простоя оборудования в плановом ремонте

$$q_i^{пл} = \frac{t_{плi}}{8760}, \quad (3)$$

где  $t_{плi}$  - длительность плановых ремонтов единицы  $i$ -го оборудования в течение года, ч.

Удельная повреждаемость силовых трансформаторов ТП одного города (число трансформаторов 385, период наблюдения 10 лет), определяемая в соответствии с формулой (2), составила величину 0,066 повреждений/трансформатор, год. Средняя длительность аварийного ремонта в год на один трансформатор составляет 3,35 часа. Тогда вероятность аварийного простоя одного трансформатора в течение года

$$q_T^{ав} = 0,263 \cdot 10^{-3}$$

Вероятность простоя трансформаторов в плановом ремонте  
 $q_{\text{T}}^{\text{пл}} = 0,172 \cdot 10^{-2}$ .

Резюме. Определены количественные показатели надежности работы силовых трансформаторов 6 кВ городских электрических сетей.

### Л и т е р а т у р а

1. Мельников Н.А. Электрические сети и системы. М., 1969.

УДК 666.11.01.621.315

С.П. Р ж е в с к а я

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МНОГОТИТАНОВЫХ СТЕКОЛ

Создание электротехнических приборов, которые обеспечили бы стабильность и воспроизводимость параметров, а также высокую надежность в работе, невозможно без детального изучения природы и механизма электрических явлений.

С целью установления зависимости между характером электропроводности и составом стекла измерено электрическое сопротивление многотитановых стекол, которые применяются для получения конденсаторных ситаллов. Электрическое сопротивление измерялось в диапазоне температур 250 - 600 °С. Исследованию подвергались стекла системы BaO - SiO<sub>2</sub> - TiO<sub>2</sub> с содержанием двуокиси титана 25 - 50 мол. %. Стекла синтезированы в электрической печи.

Температурная зависимость удельной объемной проводимости подчиняется экспоненциальному закону  $\gamma = \gamma_0 \exp W/T$ , где  $\gamma_0$  и  $W$  - постоянные,  $T$  - абсолютная температура. В координатах  $\ln \gamma - \frac{1}{T}$  эта зависимость представляет

собой прямую. Энергия активации рассчитывалась по фор-

муле  $W = 0,86 \cdot 10^{-4} \frac{\ln \rho_1 - \ln \rho_2}{1/T_1 - 1/T_2}$ , где  $\rho_1$  и

$\rho_2$  - значения удельных объемных сопротивлений стекла при температурах  $T_1$  и  $T_2$  [1].

Как показали измерения (рис. 1), увеличение в стекле количества двуокиси титана за счет окиси бария приводит к



росту удельной проводимости при условии, что отношение  $\text{BaO}/\text{TiO}_2 \leq 1$ . Значение энергии активации для этих стекол постоянно и равно 1,7 эВ. Это свидетельствует об одинаковом механизме электропроводности стекол данной области составов.

Стекла, характеризующиеся соотношением  $\text{BaO}/\text{TiO}_2 \geq 1$ , имеют очень низкую проводимость, но при увеличении содержания окиси бария заметна тенденция к ее росту (рис. 2). Энергия активации существенно не меняется и остается близка к величине 1,7 эВ.

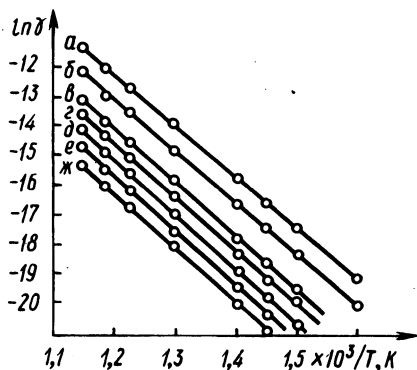


Рис. 1. Температурная зависимость удельной объемной электрической проводимости стекол  $\text{BaO}/\text{TiO}_2$ : а-0,5; б-0,56; в-0,75; г-0,87; д-1; е-1,14; ж-1,5.

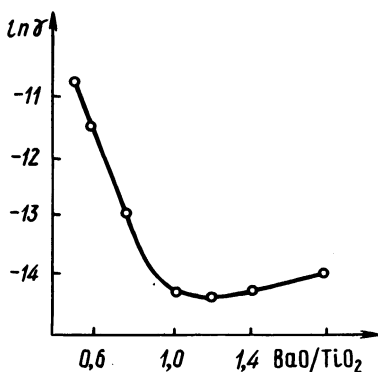


Рис. 2. Зависимость удельной объемной электрической проводимости при  $600^\circ\text{C}$  от состава стекла.

Как видно из рис. 2, исследованные стекла можно разделить на 2 группы, у которых отношение  $\text{BaO}/\text{TiO}_2$  меньше или больше единицы. Для первой группы, характеризующихся отношением  $\text{BaO}/\text{TiO}_2 < 1$ , величина удельной проводимости определяется количеством двуокиси титана. Для второй группы стекол ( $\text{BaO}/\text{TiO}_2 \geq 1$ ) удельная проводимость начинает зависеть от количества окиси бария.

Полученные зависимости вытекают из работы [2], где исследовалось структурное состояние иона титана в титано-силикатных стеклах и определялось присутствие в виде небольшой примеси октаэдрически координированного титана  $[\text{TiO}_6]$ , количество которого резко возрастает при уменьшении отношения  $\text{BaO}/\text{TiO}_2$  ниже единицы. Кроме того, присутствие комплексов  $[\text{TiO}_6]$  повышает склонность иона титана к восстановлению [3]. При этих условиях для стекол, содержащих комплексы  $[\text{TiO}_6]$  (такое условие соблюда-

ется при  $\text{BaO}/\text{TiO}_2 < 1$ ), оказывается возможным электронный обмен  $\text{Ti}^{4+} \rightleftharpoons \bar{e} + \text{Ti}^{3+}$ , т.е. наличие электронной проводимости. При этом величина удельной проводимости должна уменьшаться по мере роста соотношения  $\text{BaO}/\text{TiO}_2$ , что и наблюдалось в исследованных стеклах. Возрастание величины удельной проводимости у стекол с отношением  $\text{BaO}/\text{TiO}_2 > 1$  свидетельствует о том, что характер электропроводимости стекол с вышеуказанным соотношением компонент становится ионным.

Резюме. Проведенное исследование показало, что электропроводность многотитановых стекол зависит от двуокиси титана и окиси бария в стекле и определяется координационно-валентным состоянием иона титана.

#### Л и т е р а т у р а

1. Данлэп У. Введение в физику полупроводников. М., 1959.
2. Варшал Б.Г., Илюхин В.В., Белов Н.В. Кристаллохимические аспекты ликвационных явлений в трехкомпонентных титаносиликатных системах. - Тез. докл. II Всесоюз. симпозиума по ликвационным явлениям в стеклах. Л., 1973.
3. Цехомский В.А. Полупроводниковые стекла на основе окислов железа и титана. - Автореф. канд. дис. Л., 1966.

В.Л. Анхимюк, докт. техн. наук,  
В.А. Новицкая

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ ТИРИСТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

При исследовании динамики систем автоматизированного электропривода с вентильными преобразователями постоянного тока используются математические (динамические) модели, характеризующие изменение переменных состояния системы, которые обычно представляют собой средние значения. Эти модели представляются различными структурами, отражающими работу системы в режимах непрерывных и прерывистых токов. В последнем случае вводятся в рассмотрение эквивалентные значения активных сопротивлений и индуктивностей, представляющие собой фиктивные величины.

Такое представление затрудняет анализ переходных процессов в перемежающихся режимах непрерывного и прерывистого токов, поскольку прогнозировать границы этих режимов практически невозможно.

Указанные недостатки в значительной мере устраняются в случае использования нелинейной динамической модели, характеризующейся изменением переменных состояния в виде мгновенных значений фазовых координат. В этом случае в обоих режимах используются натуральные значения сопротивлений и индуктивностей главной цепи. В пассивной зоне, при работе системы в режиме прерывистых токов в силу разрыва цепи питания двигателя сопротивление главной цепи равно бесконечности (двигатель переходит в режим свободного выбега).

Преобразователь рассматривается как безынерционное импульсное звено, характеризующееся последовательностью знакопостоянных либо знакопеременных усеченных синусоидальных импульсов.

Преимущество рассматриваемой динамической модели состоит в более полном исследовании переходных процессов в отдельных зонах интервала дискретности (активной и пассивной зонах, зонах коммутации, зоне работы шунтирующего вентиля и т.д.).

На рис. 1 приведена динамическая модель нереверсивного вентильного электропривода, где  $K_T$ ,  $K_M$  — динамические

звенья двигателя;  $I_C R_O$  - возмущающее воздействие; ВП - вентильный преобразователь;  $F(t)$  - операторные изображения функций управления, представляющей собой последователь-

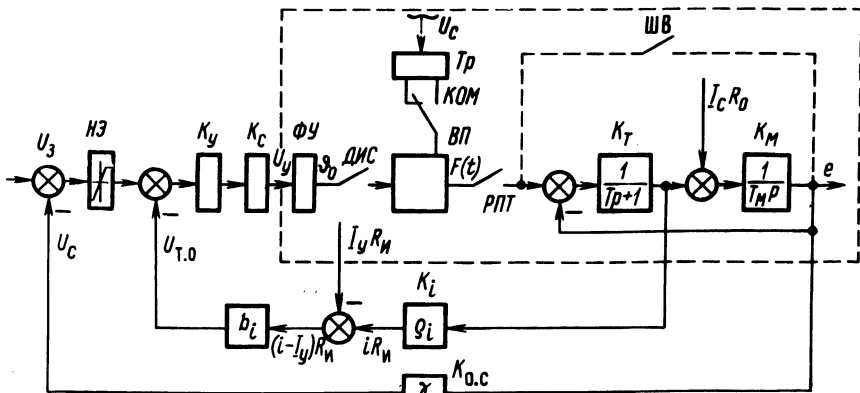


Рис. 1.

ность импульсов выходного напряжения преобразователя; РПТ - ключ, имитирующий режим прерывистого тока путем разрыва цепи вентильный преобразователь-двигатель; ФУ - фазосдвигающее устройство; ДИС - ключ, имитирующий дискретность вентильного преобразователя, замыкающийся в контактные моменты времени, соответствующие подаче на ФУ управляющего напряжения  $U_y$ , формирующего угол открывания вентиля и находящийся в разомкнутом состоянии в течение всего интервала дискретности;  $K_c$ ,  $K_y$  - динамические звенья корректирующего устройства и усилителя; НЭ - нелинейный элемент (диод, стабилитрон и т.д.), ограничивающий напряжение на входе системы в период пуска (защита входа);  $K_{O.C}$  - звено в цепи обратной связи по скорости;  $K_i$  - звено в цепи обратной связи по току;  $iR_{и}$ ,  $I_y R_{и}$  - напряжение на измерительном сопротивлении и напряжение уставки токовой отсечки;  $Tr$  - согласующий трансформатор; КОМ - ключ, имитирующий коммутацию тока с тиристора на тиристор, либо с тиристора на шунтирующий вентиль. Там же показан контур включения шунтирующего вентиля, имитируемого ключом ШВ. При коммутации тока с тиристора на тиристор в схемах без шунтирующего вентиля ключ КОМ сначала включен на тиристор предыдущей (работающей) фазы трансформатора (левое положение); затем перекрывает обе фазы трансформатора - предыдущую и вступающую в работу (последующую) фазу и, наконец, переводится в правое положение, в котором включен тиристор только последующей фазы трансформатора.

Рассматриваемая динамическая модель состоит из двух частей: неизменяемой части структуры (обведена пунктиром) и изменяемой (регулятор с системой обратных связей).

Напряжение управления формируется под влиянием задающего воздействия и результирующего сигнала, вырабатываемого регулятором, контролирующим координаты объекта управления посредством системы обратных связей.

Так как открывание тиристорov в замкнутой системе осуществляется в контактные моменты в конце интервала дискретности, то в течение следующего интервала дискретности система оказывается разомкнутой относительно управляющего напряжения, и изменение  $U_y$  на этом интервале под действием регулятора до следующего контактного момента никакого влияния на переходный процесс оказывать не будет.

Поэтому можно составить обобщенный алгоритм расчета переходного процесса электропривода как разомкнутой системы при постоянном значении угла открывания в пределах интервала дискретности, независимо от характера полной структуры динамической модели системы.

Для системы вентильного электропривода уравнение напряжений главной цепи в режиме непрерывных токов и в активной зоне прерывистых токов

$$\epsilon + i + T \frac{di}{dt} = F(t),$$

а уравнение движения электропривода при постоянстве магнитного потока двигателя

$$i_c + T_m \frac{d\epsilon}{dt} = i.$$

В пассивной зоне прерывистых токов система описывается одним уравнением свободного выбега двигателя

$$T_m \frac{d\epsilon}{dt} = -i_c.$$

Функция управления  $F(t)$  в случае отсутствия шунтирующего диода и идеальной коммутаций имеет вид

$$F(t) = \sum_{k=1}^n f_k(t) [1(\alpha_t^k) - 1(\alpha_t^{k+1})].$$

Здесь

$$f_k(t) = \sin \beta_t^k, \beta_t^k = \vartheta_{\text{нач}} + \alpha_t^k, \alpha_t^k = \omega(t - t_{k-1}),$$

где  $k$  - номер рассматриваемого интервала проводимости;  $\vartheta_{\text{нач}}$  - начальный угол открывания тиристора.

Уравнения регулятора составляются на основании заданной структуры вентильного электропривода в виде операторного уравнения, связывающего управляющее напряжение с контролируемыми фазовыми координатами объекта управления.

Резюме. Нелинейная динамическая модель охватывает все режимы работы вентильного электропривода, носит обобщенный характер и проста по принципу своего построения.

УДК 62 - 83:621.313.13

В.Л. Анхимюк, докт. техн. наук,  
М.П. Слукка

### ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ С ФАЗОВЫМ ДИСКРИМИНАТОРОМ

В прецизионных электроприводах постоянного тока нашел широкое применение принцип фазового сравнения частот. Этому способствовало использование кварцевых генераторов в качестве задающего устройства. Эти генераторы имеют погрешность стабилизации частоты  $1 \cdot 10^{-5} \div 6 \cdot 10^{-12}$ . В сочетании с дискретными делителями частоты они практически не вносят погрешностей в систему управления. Применение фазового дискриминатора для выявления разности частот сигнала задания и обратной связи позволяет получить интегральную составляющую этой разности. Рассматриваемая система стабилизации частоты вращения двигателя сходна с известными в радиотехнике системами фазовой автоподстройки частоты [1].

В синхронном режиме структурная схема электропривода изображена на рис. 1, а. Она содержит двигатель постоянного тока (звенья  $K_T$  и  $K_\theta$ ), преобразователь  $K_P$ , фазовый дискриминатор  $K_{\text{фд}}$  с непериодической многопетлевой нормированной характеристикой, имеющей линейный рабочий участок. Все эти звенья охвачены отрицательной обратной связью по скорости (э.д.с.) двигателя при  $\Phi_B = \text{const}$ . На вход системы подается задающее воздействие  $f$ .

Синхронный режим является режимом стабилизации. При этом для качественной работы системы необходимо, чтобы возникающие под действием возмущений колебания угла рассогласования  $\varphi$  не выходили за пределы интервала квантования импульсного датчика скорости. Это позволяет представить фазовый дискриминатор линейным звеном, а систему стабилизации частоты вращения рассматривать как линейную сис-

тему подчиненного регулирования, содержащую внутренний контур статического регулирования (обведен пунктиром) и внешний контур астатического регулирования. Поэтому к данной системе может быть применен метод последовательной оптимизации [2].

Для оптимизации контура статического регулирования используется метод динамического программирования. При приложении возмущения  $F$  этот контур описывается системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= b_{12} (x_2 - F); \\ \dot{x}_2 &= b_{21} (-x_1 - x_2 + x_3); \\ \dot{x}_3 &= -b_{33} x_3 + mV, \end{aligned} \right\} (1)$$

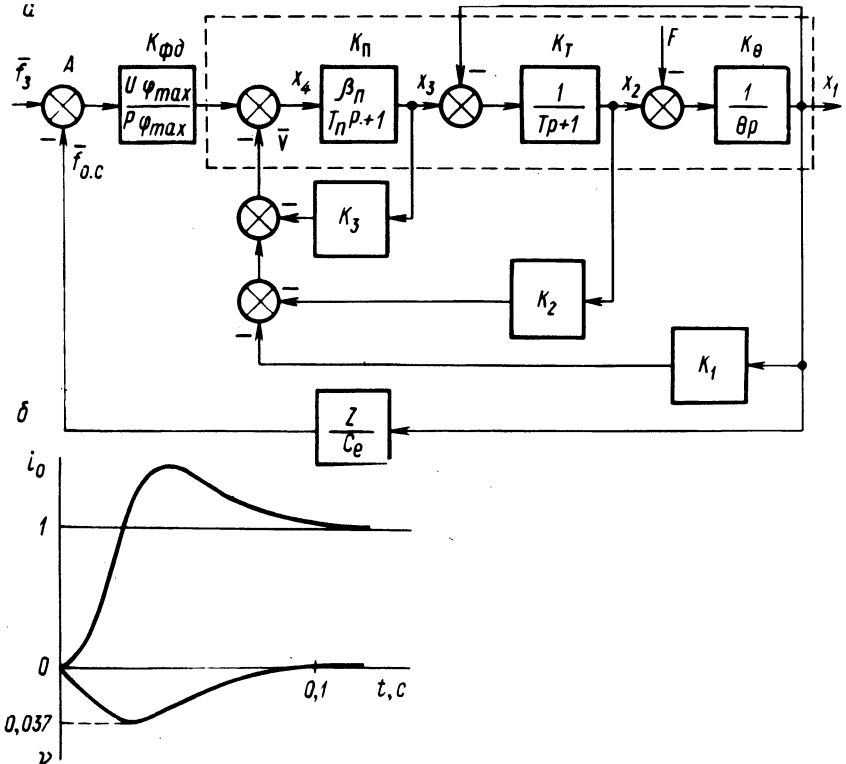


Рис. 1. Структурная схема оптимизированной фазо-импульсной системы стабилизации частоты вращения двигателя (а) и осциллограммы переходных процессов (б);  $F$  - основное возмущающее воздействие,  $F = i_c R_o$ ;  $V$  - управление;  $T$ ,  $T_p$  - электромагнитные постоянные времени главной цепи и преобразователя;  $\theta$  - электромеханическая постоянная времени привода;  $\beta_p$  - коэффициент усиления преобразователя;  $Z$  - число импульсов, снимаемых с импульсного датчика скорости за один оборот вала двигателя;  $V_{\varphi \max}$  - наибольшее значение модуля выходного напряжения фазового дискриминатора при максимальном угле рассогласования  $\varphi_{\max}$  частот  $f_{\omega}$  и  $f_{o,c}$ .

где  $x_1 = \Delta e$ ;  $x_2 = iR_0$ ;  $x_3 = \Delta e_{\Pi}$  - координаты системы, представляющие собой соответственно отклонения: э.д.с. двигателя, напряжения, пропорционального току главной цепи, э.д.с. преобразователя от ее значения при идеальном холостом ходе;

$$b_{12} = 1/\theta; \quad b_{21} = 1/T; \quad b_{33} = 1/T_{\Pi}; \quad m = \beta_{\Pi}/T.$$

Алгоритм управления при регулировании по отклонению, найденный на основании минимизации функционала качества,

$$I = \int_0^{\infty} (W + c V^2) dt, \quad (2)$$

где  $W = \lambda_1 x_1^2 + \lambda_2 x_2^2 + \lambda_3 x_3^2$  - функции координат системы;  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, c$  - весовые множители;  $V$  - скалярная функция, описывающая управление

$$V = - \frac{m}{2c} \frac{\partial \Psi}{\partial x_3}, \quad (3)$$

где  $\Psi$  - производящая функция, которая (для обеспечения асимптотической устойчивости системы) должна являться функцией Ляпунова.

Используя в качестве функции Ляпунова определенно положительную квадратичную форму, можно записать

$$V = -(k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3), \quad (4)$$

где  $k_1 = \frac{m}{c} A_{13}$ ;  $k_2 = \frac{m}{c} A_{23}$ ;  $k_3 = \frac{m}{c} A_{33}$  - коэффициенты усиления регулятора, стабилизирующего координаты системы при условии минимума интегральной квадратичной ошибки (2), которые определяются коэффициентами квадратичной формы  $A_{13}, A_{23}, A_{33}$ .

Методы определения весовых множителей  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , зависящих от требований к показателям переходного процесса при возмущающем воздействии, и вычисление соответствующих значений  $A_{13}, A_{23}, A_{33}$  изложены в [2]. Алгоритм управления (4) определяет структуру регулятора с аналоговыми жесткими обратными связями по координатам  $x_1, x_2, x_3$ .

Оптимизация контура астатического регулирования заключается в выборе постоянной времени интегрирующего звена с передаточной функцией

$$K_{\text{и}} = 1/T_{\text{и}} p = \alpha_{\text{и}} / p.$$



Передаточная функция системы (рис. 1, а) по возмущающему воздействию с учетом управления (4) имеет вид

$$W_f - \frac{x_1}{F} = \frac{BC + k_3 \beta_{\Pi} B + k_2 \beta_{\Pi}}{DC + k_3 \beta_{\Pi} D + k_2 \beta_{\Pi} \theta + \beta_{\Pi} (k_1 + \alpha_{\text{и}}/p)}, \quad (5)$$

где  $B = T_p + 1$ ;  $C = T_{\text{п}} + 1$ ;  $D = \theta T_p^2 + \theta p + 1$ .

Рациональное значение  $\alpha_{\text{и}}$  может быть найдено на основании требуемого распределения корней вырожденного характеристического уравнения (при  $\beta_{\Pi} \rightarrow \infty$ ):

$$k_3 (\theta T_p^2 + \theta p + 1) + k_2 \theta p + k_1 + \alpha_{\text{и}}/p = 0. \quad \text{э} \quad (6)$$

Значение  $\alpha_{\text{и}}$  находим из условия, близкого к техническому оптимуму, т.е. выбирая соотношение корней уравнения (6), при котором коэффициенты затухания апериодической и колебательной составляющих одинаковы, а мнимая часть комплексно-сопряженных корней близка к вещественной.

Найденное значение  $\alpha_{\text{и}}$  позволяет определить величину  $z$  учитывая, что

$$\alpha_{\text{и}} = \frac{U_{\varphi \text{ max}} z}{\varphi_{\text{ max}} C_e}, \quad (7)$$

где  $C_e$  - параметр электродвигателя,  $\frac{B}{\text{об./с}}$ .

На рис. 1, б показаны осциллограммы переходных процессов скорости  $v = \Delta e / I_c R_o = f(t)$  и  $i_o = i / I_c = f(t)$  для синхронного режима модели фазо-импульсной системы стабилизации частоты вращения двигателя при возмущающем воздействии. Параметры системы:  $\theta = 0,266$  с,  $T = 0,06$  с,  $C_e = 102 \frac{B}{\text{об./с}}$ ,  $\beta_{\Pi} = 250$ ,  $T_{\Pi} = 0,01$  с,

$$U_{\varphi \text{ max}} = 10 \text{ В}, \quad k_2 = 0,55, \quad k_3 = 0,004, \quad k_1 = 10,04, \quad z = 56.$$

Резюме. Получена система электропривода с фазовым дискриминатором, имеющая высокие динамические и статические свойства, регулятор которой содержит лишь жесткие обратные связи по координатам объекта.

#### Л и т е р а т у р а

1. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. Системы фазовой автоподстройки частоты. М., 1972. 2. Анхимюк В.Л. Применение метода динамического программирования к построению систем стабилизации скорости электропривода. - "Изв. вузов. Электромеханика", 1975, № 9.

Н.Н. Михеев, канд. техн. наук,  
Е.П. Раткевич

## ПРИБЛИЖЕННАЯ МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЬНЫХ ПРИВОДОВ

Построение статических характеристик вентильных приводов постоянного тока с преобразователями с нулевыми вентилями можно упростить, заменив участки синусоиды выпрямленного напряжения параболой или прямой линией.

Приближенную методику рассмотрим на примере построения статических характеристик многодвигательных приводов [1, 2]. Привод включает в себя базовый выпрямитель БВ (рис. 1, а), обеспечивающий изменение напряжения на зажимах 1 и 2, и вентильные цепочки, независимо регулирующие скорости вращения двигателей. Каждая цепочка состоит из отдельного (В1) и шунтирующего (В2) вентилей. Линейная диаграмма напряжения, приложенного к двигателю, представлена на рис. 1, б (кривая 1). Углы зажигания отдельных вентилей могут меняться от 60° до 180°.

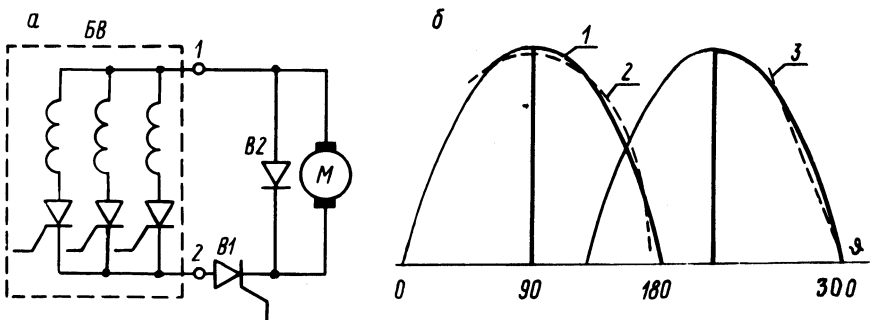


Рис. 1.

Уравнения параболы (рис. 1, б, кривая 2) и прямой линии (рис. 1, б, прямая 3) определены по способу наименьших квадратов

$$u = U_M (a^2 \vartheta^2 + b \vartheta + c) = U_M (-0,403 \vartheta^2 + 1,236 \vartheta + 0,0406); \quad (1)$$

$$u = U_M (b \vartheta + c) = U_M (-0,833 \vartheta + 0,903), \quad (2)$$

где  $U_M$  - амплитуда питающего напряжения;  $\vartheta$  - текущий угол открытого состояния вентиля.

Первое уравнение выведено для  $60^\circ < \vartheta < 170^\circ$  ( $\vartheta$  отсчитывается от начала синусоиды), второе - для  $120^\circ < \vartheta < 180^\circ$  ( $\vartheta$  отсчитывается от  $120^\circ$  эл.).

Статическая характеристика привода в области прерывистого тока состоит из двух участков: 1) работает только отделительный вентиль; 2) работают отделительный и шунтирующий вентили.

Первый участок. Ток, протекающий через отделительный вентиль в прерывистом режиме при параболическом изменении напряжения

$$i_{от}^* = a \vartheta^2 + \vartheta (2a \vartheta_3 + b - 2a \operatorname{tg} \theta) + (1 - e^{-\vartheta \operatorname{ctg} \theta}) (2a \operatorname{tg}^2 \theta + a \vartheta_3^2 + b \vartheta_3 + c - \varepsilon - 2a \vartheta_3 \operatorname{tg} \theta - b \operatorname{tg} \theta); \quad (3)$$

при линейном изменении напряжения

$$i_{от}^* = b \vartheta + (b \vartheta_3 + c - \varepsilon - b \operatorname{tg} \theta) (1 - e^{-\vartheta \operatorname{ctg} \theta}), \quad (4)$$

где  $i_{от}^*$  - относительное значение тока;  $i_{от}^* = \frac{i_{от} R}{U_M}$ ;  $\varepsilon$  - относительное значение противо-э.д.с. двигателя:

$$\varepsilon = \frac{E}{U_M};$$

$\vartheta_3$  - угол зажигания отделительного вентиля;  $\theta = \operatorname{arctg} \omega T$ ;  $T$  - электромагнитная постоянная времени цепи якоря двигателя.

Подставив в выражение (3, 4) вместо  $\vartheta$  длительность горения отделительного вентиля  $\lambda_{от}$  и заменив показательную функцию многочленом

$$e^{-\vartheta \operatorname{ctg} \theta} = 1 - \vartheta \operatorname{ctg} \theta + \frac{1}{2} \vartheta^2 \operatorname{ctg}^2 \theta,$$

получим соответственно

$$\lambda_{от} (k_1 + \varepsilon) + k_2 - 2 \varepsilon \operatorname{tg} \theta = 0, \quad (5)$$

где

$$k_1 = 2a \vartheta_3 \operatorname{tg} \theta + b \operatorname{tg} \theta - a \vartheta_3^2 - b \vartheta_3 - c;$$

$$k_2 = 2 \operatorname{tg} \theta (a \vartheta_3^2 + b \vartheta_3 + c);$$



горения шунтирующего вентиля. Поэтому вблизи границы непрерывного режима необходимо соединить плавной кривой участки статической характеристики для непрерывного и прерывистого режимов.

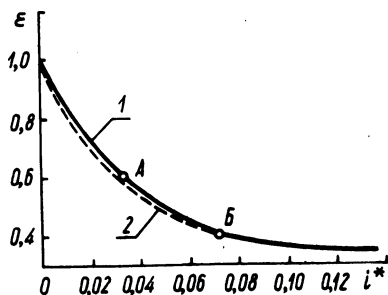


Рис. 2.

На рис. 2 приведены статические характеристики для  $\varphi = 90^\circ$ ,  $T = 0,01$  с, рассчитанные по точным формулам (кривая 1) и приближенным (кривая 2), что подтверждает достаточно высокую точность предлагаемой методики.

Резюме. Аппроксимация участков синусоиды выпрямленного напряжения параболой и прямой линией и замена показательной функции многочленом позволяют упростить методику построения статических характеристик в прерывистом режиме вентильных приводов с преобразователями с нулевыми вентилями.

#### Л и т е р а т у р а

1. Анхимюк В.Л., Михеев Н.Н., Романов В.В. Вентильный многодвигательный электропривод. Авт. свид. № 350121. - "Бюл. изобр.", 1972, № 6.
2. Михеев Н.Н., Кривцов В.В., Раткевич Е.П. Вентильный многодвигательный электропривод. Авт. свид. № 485534. - "Бюл. изобр.", 1975, № 35.

УДК 62 - 523

Н.Н. Михеев, канд. техн. наук,  
В.Н. Сацукевич, Е.П. Раткевич

#### О СОСТАВЛЕНИИ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ПО СТРУКТУРНОЙ СХЕМЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Получение выражения для передаточной функции сложной многоконтурной системы, как правило, требует значительных затрат времени и применения множества промежуточных преобразований.

Применение формулы Мейсона [1] позволяет получить выражение для передаточной функции более быстро, но полученное выражение требует дополнительных преобразований для приведения его к окончательному виду.

Выведем формулу, позволяющую получить выражение для передаточной функции сложной многоконтурной системы в виде, близком к окончательному. Представим формулу Мейсона в виде

$$W(p) = \frac{\sum_n W_n(p) \Delta_n(p)}{\Delta(p)} = \frac{\sum_n W_n(p) - \sum_n W_n(p) \sum_{kn} W_{kn}(p) + \sum_n W_n(p) \sum_{in} W_{in}(p) W_{jn}(p) - \dots}{1 - \sum_k W_k(p) + \sum_i W_i(p) W_j(p) - \sum_i W_i(p) W_j(p) W_q(p) + \dots} \quad (1)$$

где  $W_n(p)$  - передаточная функция  $n$ -го прямого канала от входа к выходу структурной схемы системы (от входного воздействия к выходной величине);  $W_k(p)$  - передаточная функция  $k$ -го контура;  $\sum W_i(p) W_j(p)$ ;  $\sum W_i(p) W_j(p) \times W_q(p)$  - суммы произведений двух, трех и т.д. передаточных функций контуров, не соприкасающихся друг с другом;

$\Delta_n(p) = 1 - \sum_{kn} W_{kn}(p) + \sum_{in} W_{in}(p) W_{jn}(p) - \dots$  остаток от  $\Delta(p)$  после изъятия из структурной схемы  $n$ -го прямого канала (при этом выпадают другие параллельные каналы, начинающиеся или заканчивающиеся в общих с этим каналом точках);  $W_{kn}(p)$  - передаточная функция  $k$ -го контура, сохранившегося после изъятия из структурной схемы  $n$ -го прямого канала;  $\sum W_{in}(p) W_{jn}(p)$ ;  $\sum W_{in}(p) W_{jn}(p) \times W_{qn}(p)$  - суммы произведений двух, трех и т.д. передаточных функций контуров, не соприкасающихся друг с другом и сохранившихся после изъятия  $n$ -го прямого канала. Все передаточные функции должны писаться со знаком плюс или минус в зависимости от знака сигналов на выходе соответствующих звеньев в структурной схеме.

Учитывая, что каждая передаточная функция прямого канала или контура содержит  $m$  передаточных функций динамических звеньев, представим передаточные функции, входящие в выражение (1) в виде произведений полиномов числителей  $d$ , деленных на произведение полиномов  $g$  знаменателей динамических звеньев, входящих в данную передаточную функцию.

Тогда

$$W_n(p) = \frac{\prod m_n^d m_n}{\prod q m_n}; W_k(p) = \frac{\prod m_k^d m_k}{\prod g m_k};$$

$$W_n(p) \sum_{kn} W_{kn}(p) = \sum_{kn} \frac{\prod m_n^d m_n \prod m_{kn}^d m_{kn}}{\prod g m_n \prod g m_{kn}};$$

$$W_n(p) \sum_{in} W_{in}(p) W_{jn}(p) = \sum_{in, jn} \frac{\prod m_n^d m_n \prod m_{in}^d m_{in} \prod m_{jn}^d m_{jn}}{\prod g m_n \prod g m_{in} \prod g m_{jn}}; \quad (2)$$

$$W_i(p) W_j(p) = \frac{\prod m_i^d m_i \prod m_j^d m_j}{\prod g m_i \prod g m_j};$$

$$W_i(p) W_j(p) W_q(p) = \frac{\prod m_i^d m_i \prod m_j^d m_j \prod m_q^d m_q}{\prod g m_i \prod g m_j \prod g m_q}.$$

Передаточные функции  $W_n(p)$  и  $W_{kn}(p)$ ;  $W_i(p)$  и  $W_j(p)$ ;  $W_n(p)$ ,  $W_{in}(p)$  и  $W_{jn}(p)$ ;  $W_i(p)$ ,  $W_j(p)$  и  $W_q(p)$  не содержат общих динамических звеньев, так как представляют собой передаточные функции контуров, сохранившихся после изъятия  $n$ -го прямого канала, или несоприкасающихся друг с другом.

В каждую передаточную функцию не вошло 1 остальных динамических звеньев системы. Умножим числители и знаменатели всех полученных выше выражений (2) на произведение полиномов знаменателей передаточных функций динамических звеньев, не вошедших в данное выражение, т.е. умножим таким образом, чтобы в знаменатели выражений (2) входили полиномы знаменателей  $\prod_N g_N$  всех динамических звеньев системы:

$$W_n(p) = \frac{\prod m_n^d m_n \prod m_n^1 \prod m_n^1}{\prod_N g_N}; W_k(p) = \frac{\prod m_k^d m_k \prod m_k^1 \prod g_k^1}{\prod_N g_N};$$

$$W_n(p) \sum_{kn} W_{kn}(p) = \sum_{kn} \frac{\prod m_n^d m_n \prod m_{kn}^d m_{kn} \prod m_{kn}^1 \prod g_{kn}^1}{\prod_N g_N};$$

$$W_n(p) \Sigma W_{in}(p) W_{jn}(p) = \Sigma \frac{\prod_n^d m_n \prod_n^d m_{in} \prod_n^d m_{jn} \prod_{ijn}^d g_{ijn}}{\prod_N^d g_N} \quad (3)$$

$$W_i(p) W_j(p) = \frac{\prod_i^d m_i \prod_j^d m_{ij} \prod_{ij}^d g_{ij}}{\prod_N^d g_N};$$

$$W_i(p) W_j(p) W_q(p) = \frac{\prod_i^d m_i \prod_j^d m_{ij} \prod_q^d m_{ijq} \prod_{ijq}^d g_{ijq}}{\prod_N^d g_N}.$$

Подставляя выражения (3) в (1) и сокращая на общий знаменатель, получим окончательное выражение для передаточной функции системы

$$W(p) = \frac{\sum_n \prod_n^d m_n \prod_n^d g_n - \sum_n \sum_{kn} \prod_n^d m_n \prod_{kn}^d m_{kn} \prod_{kn}^d g_{kn} + \sum_n \sum_{m_i} \prod_i^d m_i \prod_{m_j}^d m_{ij} \prod_{ij}^d g_{ij} - \dots}{\prod_N^d g_N - \sum_k \prod_k^d m_k \prod_k^d g_k + \sum_{m_i} \prod_i^d m_i \prod_{m_j}^d m_{ij} \prod_{ij}^d g_{ij} - \dots - \sum_{m_i} \prod_i^d m_i \prod_{m_j}^d m_{ij} \prod_{m_q}^d m_{ijq} \prod_{ijq}^d g_{ijq} + \dots}$$

Резюме. Полученное выражение для передаточной функции сложной многоконтурной системы имеет вид, близкий к окончательному, и позволяет легко получить выражение передаточной функции по структурной схеме конкретной системы.

#### Л и т е р а т у р а

1. Траксел Д. Синтез систем автоматического регулирования. М., 1959.

УДК 621.313.333

О.П. Ильин, канд. техн. наук, П.П. Примшиц

### СИНТЕЗ ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

В статье рассматриваются вопросы синтеза эталонной модели с учетом имеющихся в системе регулирования ограничений.



Передаточная функция эталонной модели

$$W_M(p) = \frac{\bar{y}_M}{q} = \frac{1}{b_2 p^2 + b_1 p + 1}, \quad (1)$$

где  $\bar{q}$  - изображение входного воздействия;  $\bar{y}_M$  - изображение выходной координаты модели.

При  $b_2 = 0,5 b_1^2$  и  $b_1 = b$  корни характеристического уравнения равны

$$p_{1,2} = -\frac{1}{b} + j \frac{1}{b} = -\alpha \pm j\alpha,$$

что соответствует максимальному быстродействию с перерегулированием 4,3%. Чем больше значение  $\alpha$ , тем больше быстродействие системы. Но так как выходная координата модели и объекта практически совпадают, то выходная координата объекта будет изменяться по закону

$$y = [1 - e^{-\alpha t} (\sin \alpha t + \cos \alpha t)] q. \quad (2)$$

Синтез эталонной модели заключается в том, чтобы определить параметр  $\alpha_{\max}$ , при котором промежуточные координаты объекта не выходят за пределы допустимых.

Пусть объект описывается дифференциальным уравнением  $n$ -го порядка с переменными параметрами

$$\sum_{i=0}^n a_i(t) \frac{d^i y}{dt^i} = k(t) q. \quad (3)$$

Ограничения, накладываемые на промежуточные координаты объекта  $y_\varepsilon$ , можно представить так:

$$y_{\varepsilon \max} = \left| \sum_{i=0}^{\varepsilon} C_i \frac{d^i y}{dt^i} \right|_{\max} \leq A_\varepsilon, \quad (4)$$

где  $A_\varepsilon$  - допустимое значение промежуточной координаты объекта;  $C_i$  - коэффициенты, которые определяются из конкретной структуры объекта регулирования.

С учетом (2), условие (4) запишется

$$y_{\varepsilon \max} = \left| \sum_{i=0}^{\varepsilon} C_i \frac{d^i q [1 - e^{-\alpha t} (\sin \alpha t + \cos \alpha t)]}{dt^i} \right|_{\max} \leq A_\varepsilon \quad (5)$$

$$\text{или } y_{\varepsilon \max} = \left| q [C_0 + e^{-\alpha t} (a \sin \alpha t + b \cos \alpha t)] \right|_{\max}, \quad (6)$$

где  $q$  - ступенчатое воздействие;  $a = f_1(C_i, \alpha)$ ;  $b = f_2(C_i, \alpha)$ . Если  $\varepsilon = 6$  (а для реально рассматриваемых систем  $\varepsilon$  вряд ли может быть  $> 6$ ), то

$$a = -C_0 + 2\alpha C_1 - 2\alpha^2 C_2 + 4\alpha^4 C_4 - 8\alpha^5 C_5 + 8\alpha^6 C_6; \quad (7)$$

$$b = -C_0 + 2\alpha^2 C_2 - 4\alpha^3 C_3 + 4\alpha^4 C_4 - 8\alpha^6 C_6. \quad (8)$$

Если  $\varepsilon < 6$ , то коэффициенты  $a$  и  $b$  определяются из выражений (7) и (8) путем приравнивания соответствующих коэффициентов  $C_i$  нулю.

Чтобы найти время  $t$ , при котором определяется максимум функции (6), продифференцируем ее и приравняем нулю

$$\frac{dy_\varepsilon}{dt} = \alpha e^{-\alpha t} (a \cos \alpha t - b \sin \alpha t - a \sin \alpha t - b \cos \alpha t) = 0.$$

Очевидно, что  $\alpha e^{-\alpha t}$  не может быть равным нулю, поэтому

$$\left. \begin{aligned} a \cos \alpha t - b \sin \alpha t - a \sin \alpha t - b \cos \alpha t &= 0; \\ \alpha t &= \arctg \frac{a-b}{a+b}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Если  $\frac{a-b}{a+b} < 0$ , то  $\alpha t$  необходимо определять по формуле

$$\alpha t = \arctg \frac{a-b}{a+b} + \pi. \quad (10)$$

Условия (9), (10) являются необходимыми, но недостаточными. Достаточные условия максимума функции (6) определим по второй производной

$$\frac{d^2 y_\varepsilon}{dt^2} = 2\alpha^2 e^{-\alpha t} (b \sin \alpha t - a \cos \alpha t) < 0. \quad (11)$$

Из (11) достаточное условие максимума при выполнении условия (9) или (10) будет  $b \sin \alpha t - a \cos \alpha t < 0$ . (12) Если условие (12) не соблюдается, то расчет  $y_{\varepsilon \max}$  необходимо производить при  $\alpha t = 0$ .

Изложенную методику синтеза эталонной модели рассмотрим на примере системы стабилизации усилия резания (путем изменения скорости подачи при постоянной скорости привода главного движения) на тяжелом фрезерном станке модели

6М610Ф2 -1, структурная схема которой (без учета статического тока нагрузки электродвигателя) представлена на рис. 1, где  $\beta$  - коэффициент усиления тиристорного преобразователя совместно с промежуточным усилителем;  $T$  - электромагнитная постоянная времени электродвигателя подачи;  $\theta$  - электромеханическая постоянная времени электропривода;  $\kappa$  - коэффициент, характеризующий глубину, ширину фрезерования, состояние режущего инструмента, твердость обрабатываемого материала;  $T_{\partial}$  - постоянная времени датчика усилия резания;  $\gamma$  - коэффициент обратной связи по динамической составляющей тока двигателя;  $q$  - задающее воздействие;  $\tau = 1/n_0 \cdot z$  [1]. Здесь  $n_0$  - частота вращения привода главного движения;  $z$  - число зубьев фрезы.

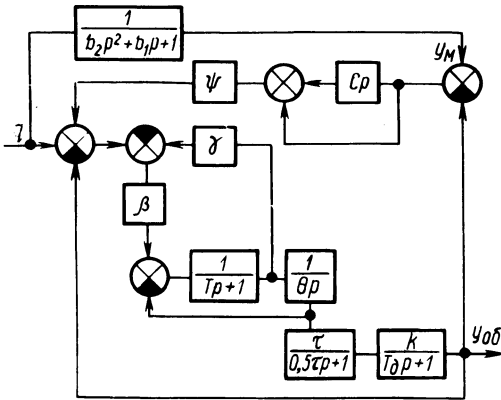


Рис. 1.

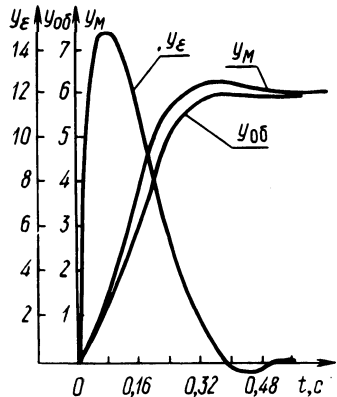


Рис. 2.

Расчет производится при следующих параметрах тип электродвигателя подачи ПБСТ = 43;  $\beta = 100$ ;  $\gamma = 0,8$ ;  $T = 0,03с$ ;  $\theta = 0,032с$ ;  $T_{\partial} = 0,02с$ ;  $z = 10$ ;  $q = 6В$ ;  $\Psi = 10$ ;  $C = 0,2$ . Определим величины  $\tau$  и  $\kappa$ . Примем  $n_0 = 10$  об./с. Тогда  $\tau = 0,01с$ , пределы изменения скорости подачи (1200 . . . 120) мм/мин. Это соответствует э.д.с. электродвигателя (100 , . . . 10) В и так как  $\kappa = \frac{q}{\tau e}$ , то  $\kappa$  будет изменяться в пределах (60 . . . 6). Ограничения накладываются по условиям коммутации на максимальную величину динамической составляющей тока электродвигателя:

$$y_E = I_{дин} r_o \leq 3 I_n r_o, \text{ т.е. } y_E \leq 18В, \text{ так как } I_n r_o = 6В.$$

Из рис. 1 можно записать:  $C_0 = 0$ ;  $C_1 = \theta / \tau k$ ;  $C_2 = (0,5\tau + T_{\partial}) \theta / \tau k$ ;  $C_3 = \frac{0,5\tau T_{\partial} \theta}{\tau k}$ .

Допустим  $\alpha = 8$ , тогда при  $k = 6$  и  $u_{\epsilon \max} = 15,6\text{В}$  при  $k = 60$ ;  $u_{\epsilon \max} = 1,56\text{ В}$ . т.е. при  $\alpha = 8$  и изменениях  $k$  в пределах  $6,0 \div 60$  динамическая составляющая тока не выходит за пределы допустимых.

Задача синтеза эталонной модели решена

$$b_2 = 0,5 / \alpha^2 = 0,078; \quad b_1 = 1 / \alpha = 0,125.$$

На рис. 2 показаны зависимости  $u_M = f_1(t)$ ;  $u_{об} = f_2(t)$ ;  $u_{\epsilon} = f_3(t)$ , рассчитанные с помощью ЦВМ, из которых видно, что  $u_{\epsilon \max} = 15\text{ В}$ . Отличие расчетного и действительного значения  $u_{\epsilon \max}$  объясняется тем, что выходные координаты модели и объекта не полностью совпадают. Поэтому при синтезе эталонной модели  $\alpha$  необходимо брать несколько меньшим расчетного значения или уточнять путем моделирования реального объекта регулирования.

Резюме. Изложенный метод позволяет просто определить параметры эталонной модели с учетом имеющихся ограничений на промежуточные координаты в системе автоматического регулирования.

### Л и т е р а т у р а

1. Абакумов А.М., Видманов Ю.И., Мехелькевич В.Н. Алгоритмизация процесса продольного течения. - "Станки и инструмент", 1972, № 9.

УДК 621.798

П.В. Ползик, канд. техн. наук,  
В.Я. Максимов

### ФОРМИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОДАЧИ В ДЕРЕВООБРАБОТКЕ

Одним из эффективных путей стабилизации сил резания является управление приводом подачи в функции изменения сил резания. В процессе обработки партии деталей изменение силы резания носит случайный характер в силу влияния неодно-

родности свойств древесины в пределах одной детали, непостоянства припуска на обработку и ряда других факторов. Измерение активной составляющей мощности резания, являющейся интегральным показателем изменения всех факторов, действующих в процессе резания, показало, что процесс изменения силы резания носит случайный характер. Анализ спектральной плотности случайного процесса изменения активной составляющей мощности резания позволил выделить область частот  $0 \leq f \leq 0,2 \text{ Гц}$ , в которой сосредоточена основная часть спектральной плотности случайного процесса.

Изменение активной составляющей мощности можно рассматривать как случайный процесс  $x(t)$ , включающий в себя шум  $N(t)$  и полезный сигнал:

$$s_1(t) = s(t) + \sum C_m f_m(t), \quad (1)$$

где  $s(t)$  - стационарный случайный процесс, а второй член правой части выражения (1) представляет собой сумму известных функций  $f_i(t)$  с неизвестными коэффициентами  $C_i$ , т.е.

$$x(t) = s_1(t) + N(t). \quad (2)$$

С другой стороны, сигнал  $x(t)$  можно представить так [1]:

$$x(t) = \varphi(t) + \overset{\circ}{x}(t), \quad (3)$$

где  $\varphi(t)$  - низкочастотная аналитическая случайная составляющая с ограниченным спектром  $(-\omega_0, \omega_0)$ ;  $\overset{\circ}{x}(t)$  - центрированный стационарный случайный процесс (высокочастотная составляющая с  $\omega \geq \omega_0$ ).

Составляющая  $\varphi(t)$  может быть представлена на конечном интервале времени  $T$  степенным рядом со случайными коэффициентами

$$\varphi(t) \approx C_0 + C_1 t + C_N t^N, \quad (4)$$

Ошибка аппроксимации, подсчитанная из предположения о конечном числе членов полинома, будет не больше, чем

$$\varepsilon = \left| \varphi_{\max} \left\{ e^{\delta} - \sum_{k=0}^N \frac{\delta^k}{k!} \right\} \right|, \quad (5)$$

где  $\delta = \frac{2\pi T}{T_0}$ ;  $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$ .

Низкочастотная составляющая  $\varphi(t)$  может быть получена посредством сглаживания сигнала  $x(t)$  некоторым оператором

ром. Одним из методов, дающих хорошие результаты [3], является метод одно- и многократного осреднения. По этому методу производится осреднение ординат кривой около данного значения  $t$  на некотором временном интервале  $T_0$ . При этом

$$\varphi(t) = \frac{1}{T_0} \int_{t-T_0}^t x(t) dt \quad (6)$$

Передаточная функция такого фильтра

$$K(p) = \frac{1 - e^{-T_0 p}}{T_0 p} \quad (7)$$

Метод многократного осреднения соответствует последовательному выполнению нескольких осреднений.

Структурная схема, соответствующая уравнению (7), представлена на рис. 1.

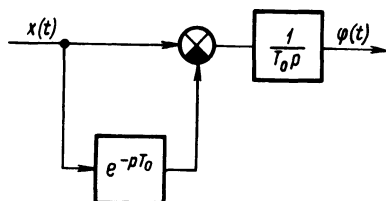


Рис. 1. Структурная схема устройства однократного осреднения.

Устройство  $n$ -кратного осреднения может быть получено последовательным включением  $n$  устройств однократного осреднения. Обработка сигнала, представленного выражением (4), соответствует классу задач, когда отношение сигнал - шум равно бесконечности. Поэтому определение импульсной переходной функции системы управления по низкочастотному каналу должно осуществляться согласно условию несмещенности

$$\int_{-\infty}^{\infty} k(t, \tau) f_m(\tau) d\tau = \int_0^T k(t, \tau) f_m(\tau) d\tau, \quad (8)$$

$m = 1, 2, \dots, n$

где  $k(t, \tau)$  - импульсная переходная функция идеальной системы. Для несмещенной обработки сигнала, заданного выражением (4), необходимо, чтобы система обладала импульсной переходной функцией [4]:



Из уравнения (13) определяется передаточная функция фильтра с конечной памятью

$$K^T(p) = \frac{9}{T p} - \frac{36}{T^2 p^2} + \frac{60}{T^3 p^3} - 1^{-T p} \left[ \frac{3}{T p} + \frac{24}{T^2 p^2} + \frac{60}{T^3 p^3} \right] \quad (15)$$

На основании выражения (15) структурная схема фильтра с конечной памятью представлена на рис. 2.

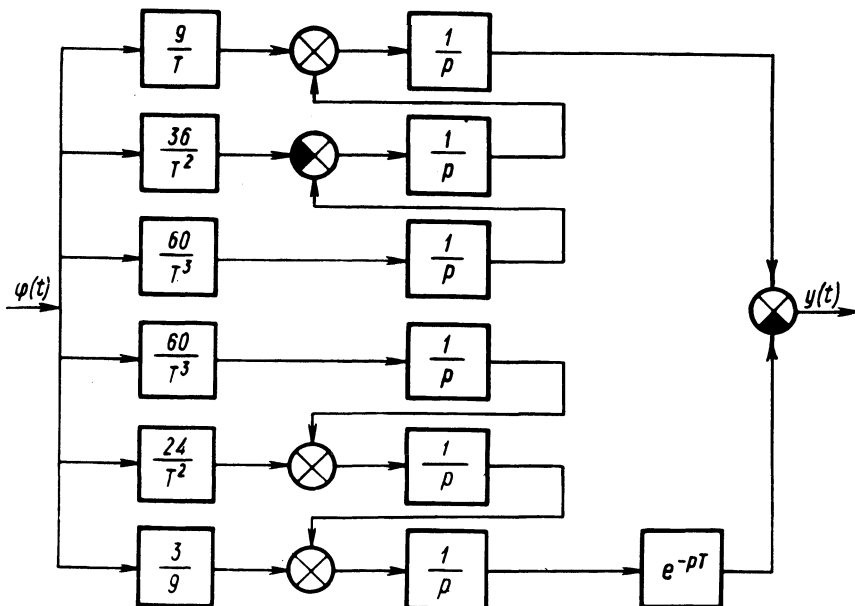


Рис. 2. Структурная схема аналогового фильтра с конечной памятью.

Данная схема реализована с использованием интегральных схем серии K140. Могут быть использованы и другие элементы аналоговой техники. Устройство формирования управляющего воздействия в системе управления приводом подачи обеспечивает заданные показатели качества системы управления.

**Резюме.** Применение устройства в виде разработанного фильтра для формирования управляющего воздействия в системе управления электроприводом подачи деревообрабатывающих станков позволяет повысить точность и качество деталей, снизить влияние высокочастотных помех.



## Л и т е р а т у р а

1. Липатов Л.Н. Методика расчета оптимальной системы автоматического управления статическим объектом. - В кн.: Автоматизация химических производств, вып. 4. М., 1963.
2. Беляев Ю.К. Аналитические случайные процессы. - В сб.: Теория вероятности и ее применение, вып. 4, 1959.
3. Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. Изд. 3. М., 1962.
4. Солодовников В.В. Статическая динамика линейных систем автоматического управления. М., 1960.

УДК 62-83:621.313.323:66

О.Н. Парфенович, канд. техн. наук,  
М.П. Слук а

### ТИРИСТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПРЯДИЛЬНЫХ МАШИН

В процессе формирования полиэфирных волокон необходимо обеспечить минимальное отклонение по толщине и удлинению [1].

Прядильно-формовочный агрегат может быть представлен объектом с входной величиной  $X$  и выходной  $Y$ . В качестве выходной величины рассмотрим номер нити  $N$ . В общем случае к объекту регулирования прикладывается  $n$  возмущений  $f_1, \dots, f_i, \dots, f_n$ . Тогда изображение отклонения выходной координаты  $Y$  от заданного значения  $Y_0$  от заданного значения  $Y_0$  можно записать

$$L[(Y_0(t) - Y(t))] = K_1(p) L[f_1(t)] + \dots + K_i(p) L[f_i(t)] + \dots + K_n(p) L[f_n(t)], \quad (1)$$

где  $K_1(p), \dots, K_i(p), \dots, K_n(p)$  - выражения передаточных функций системы, полученные по соответствующему входу при условии равенства нулю всех других возмущений.

Из (1) видно, что точность поддержания стабильности толщины нити в квазиустановившемся режиме зависит как от параметров самого объекта, так и от возмущений, воздействующих на него. Рассмотрим взаимосвязь технологических параметров из электроприводов дозирующих насосов и намоток относительно изменения толщины (номера) нити  $N$ , считая тепловые процессы в прядильной шахте стационарными.

Количество расплава  $Q_1$ , подаваемое в единицу времени дозирующим насосом при формировании нити требуемого номера, равно

$$Q_1 = 0,25 m d^2 \gamma V_{и} \quad (2)$$

где  $V_{и}$  - скорость истечения струйки расплава удельной плотностью  $\gamma$  из отверстия фильеры диаметром  $d$ ;  $m$  - число отверстий.

Вес нити, наматываемой в единицу времени на бобину [2],

$$Q_2 = 10^3 k V_o / N \quad (3)$$

где  $k$  - коэффициент, учитывающий влажность и количество замасливателя;  $V_o$  - скорость формования.

Решая (2) и (3) относительно  $N$ , получим

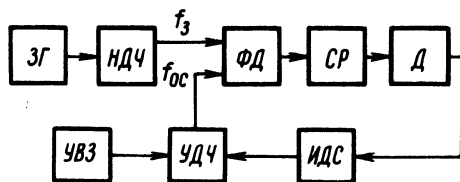
$$N = \frac{410^3 k}{\pi m} \frac{V_{и} + \Delta V}{V_{и} + d^2 \gamma} \quad (4)$$

В первом приближении погрешность  $\Delta N$  равна

$$\Delta N = \frac{\partial N}{\partial d} M d + \frac{\partial N}{\partial \gamma} \Delta \gamma + \frac{\partial N}{\partial V_{и}} \Delta V_{и} + \frac{\partial N}{\partial \Delta V} \Delta \Delta V. \quad (5)$$

Допустимая разнотолщинность для высокопрочных технических нитей 1 - 2%. Решая (5) методом линейного программирования, получим допустимое отклонение скорости электроприводов дозирующих насосов и намоток, равную 0,07 . . . 0,1%.

Рис. 1. Блок-схема электропривода: ЗГ-задающий кварцевый генератор; НДЧ, УДЧ-неуправляемый и управляемый делители частоты; ФД-фазовый дискриминатор с неперiodической многопетлевой нормированной характеристикой; СР - статический регулятор; Д- двигатель; УВЗ-устройство ввода; ИДС- фотоимпульсный датчик скорости.



Такая точность стабилизации трудно реализуется в непрерывной системе. Поэтому применительно к импортным плавно-прядильным агрегатам по производству полиэфирного кордного волокна на Могилевском производственном объединении "Химволокно", разработан электропривод с фазо-импульсным управлением, в котором фазовое рассогласование выявляется статическим триггером. Блок-схема привода приведена на рис. 1.

Сигналы задания частотой  $f_3$  и обратной связи  $f_{0,c}$  подаются на ФД. На выходе ФД получаем напряжение, пропор-

циональное углу фазового рассогласования частот  $f_3$  и  $f_{0.c}$ , которое является заданием для СР.

Исследуемый образец привода показал высокие динамические свойства (диапазон синхронизации равен диапазону удержания) при статическом отклонении скорости менее 0,1%.

Резюме. Применение принципа фазовой автоподстройки частоты [3] в электроприводе прядильных машин позволяет обеспечить стабилизацию скорости с отклонением менее 0,1%, при разнотолщинности формируемой нити менее 1%.

#### Л и т е р а т у р а

1. Фурне Ф. Синтетические волокна. Получение и переработка. Пер. с нем. М., 1970. 2. Браверман П.Ф., Чачиани А.Б. Оборудование и механизация производства химических волокон. М., 1967. 3. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. Система фазовой автоподстройки частоты. М., 1972.

УДК 621.313.333

Б.И. Фираго, канд. техн. наук,  
В.Г. Сидоров

#### ДОПУСТИМЫЙ МОМЕНТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ КВАЗИЧАСТОТНОМ УПРАВЛЕНИИ

Основой для расчета допустимого момента асинхронного двигателя (АД) следует считать условие неперегрева обмотки статора при работе АД на пониженных частотах [1], т.е.

$$\frac{\Delta P_{\tau_n}}{B(\omega_n)} = \frac{\Delta P_{\tau}}{B(\omega)}, \quad (1)$$

где  $\Delta P_{\tau_n}$ ,  $\Delta P_{\tau}$  - греющие потери в номинальном и расчетном режимах;  $B(\omega_n)$ ,  $B(\omega)$  - теплоотдача в номинальном и расчетном режимах. Учитывая приближенный характер зависимостей коэффициентов внешнего подогрева [2] от скорости, можно предположить, что в расчетном режиме греющими являются все электромагнитные потери

$$\Delta P_{\tau} \cong \Delta P_{\Sigma}. \quad (2)$$

Выражение (2) еще обосновано и потому, что АД при квазичастотном регулировании работает на скоростях, меньших 1/3

$\omega_n$  [2]. Теперь уравнение (1) можно представить так:

$$\Delta P_{\tau_n} \beta = \Delta P_{\omega} \quad (3)$$

где  $\beta = \frac{B(\omega)}{B(\omega_n)}$  - коэффициент изменения теплоотдачи,

зависящий от скорости.

Расчетные электромагнитные потери в АД при питании от источника несинусоидального напряжения равны

$$\Delta P_{\omega} = \Delta P_{(1)} + \Delta P_{\text{доп}} \quad (4)$$

где  $\Delta P_{(1)}$ ,  $\Delta P_{\text{доп}}$  - потери в АД от напряжения первой и высших гармоник. Потери от напряжения первой гармоники

$$\Delta P_{(1)} = \Delta P_{M(1)S} + \Delta P_{M(1)R} + \Delta P_{\text{ст}(1)S} + \Delta P_{\text{доб}(1)} \quad (5)$$

где  $\Delta P_{M(1)S}$ ,  $\Delta P_{M(1)R}$  - потери в меди статора и ротора;  $\Delta P_{\text{ст}(1)S}$ ,  $\Delta P_{\text{доб}(1)}$  - потери в стали статора и добавочные потери. Выражение (5) при  $s \ll s_k$  можно преобразовать к виду

$$\Delta P_{(1)} = \Delta P_n \left( \rho_{(1)} \frac{\mu^2}{\varphi^2} K_{\text{фн}}^2 + \sigma_{(1)} \frac{\varphi^2}{\gamma \alpha_{(1)}} + a_{\text{эм}} \varphi^2 \right) \quad (6)$$

где  $\Delta P_n$  - номинальные потери в АД;  $\mu, \varphi$  - относительные значения момента и потока взаимной индукции АД; в качестве базовых приняты номинальный момент  $M$  и поток при идеальном холостом ходе АД  $\Phi_{\mu \text{хх}}$ ;  $\gamma$  - отношение частоты питающей сети к выходной частоте циклоконвертора  $\gamma = \frac{1}{f_2}$ ;

$\alpha_{(1)}$  - коэффициент распределения потерь в стали от гистерезиса и вихревых токов;  $\rho_{(1)}$  - коэффициент переменных потерь

$$\text{в меди АД, } \rho_{(1)} = \frac{M_n s_n \omega_{\text{он}}}{\Delta P_n} \left[ 1 + \frac{R_s}{R_r} (1 + \right.$$

$$\left. + 2 \frac{X'_R}{X_{\mu}} + \frac{\Delta P_{\text{доб}n}}{M_n s_n \omega_o} \right]; \sigma_{(1)} - \text{коэффициент потерь в}$$

стали при холостом ходе АД,  $\sigma_{(1)} = \frac{\Delta P_{\text{ст} \text{хх}}}{\Delta P_n}$ ;  $a_{\text{эм}}$  - коэффициент потерь в меди статора от намагничивающего тока

при холостом ходе АД,  $a_{\varepsilon\mu} = \frac{3 R_s I_{\mu_{xx}}}{\Delta P_H}$ .

Значение коэффициентов для АД нормального исполнения обычно лежат в пределах [1]:

$$\rho(1) = 0,58 - 0,65; \quad \zeta(1) = 0,22 - 0,25;$$

$$a_{\varepsilon\mu} = 0,03 - 0,12; \quad \alpha(1) = 1,3.$$

Дополнительные потери

$$\Delta P_{\text{доб}} = \Delta P_M - \Delta P_{M(1)S} - \Delta P_{M(1)R} \quad (7)$$

обусловлены высшими гармониками напряжения, для которых АД находится в режиме к.з. [3], поэтому  $\Delta P_{\text{доб}}$  незначительно зависит от  $\mu$ , и полностью определяются углом открывания вентилей  $\alpha$  и величиной  $\nu$ . Как показывают исследования, в асинхронных электроприводах с однополупериодными циклоконверторами целесообразно использовать законы частотного регулирования с постоянством магнитного потока в зазоре АД. Так как необходимая величина потока устанавливается с помощью  $\alpha$ , то существует косвенная зависимость  $\Delta P_{\text{доб}}$  от  $\varphi$ . На основании изложенного можно записать

$$\Delta P_{\text{доб}} = F(\mu, \varphi, \nu). \quad (8)$$

Однополупериодные циклоконверторы обычно выполняются по схеме бестрансформаторного питания от промышленной сети 380 В. Поэтому на пониженных частотах ( $\nu = 3 - 12$ ) при квазичастотном управлении преобразователи работают с углами открывания тиристоров  $\alpha > 90^\circ$ . Эта особенность

приводит к тому, что уменьшение угла сопровождается увеличением высших гармоник напряжения и ростом дополнительных потерь в АД. Как известно [4], в многовентильных циклоконверторах угол управления  $\alpha$  изменяется в диапазоне  $0 - 90^\circ$ , причем уменьшение угла приводит к снижению дополнительных потерь в АД. Проведенные исследования показывают, что в зоне нагрузок  $\mu = 0,1 - 0,4$  при  $\nu = 3 - 12$ ,  $\varphi = 0,3 - 0,9$  зависимость дополнительных потерь от потока с точностью, достаточной для практических расчетов первого приближения допустимого момента, может быть аппроксимирована следующим выражением:

$$\Delta P_{\text{доп}} = \Delta P_{\text{ном}} (K_1 \varphi + K_2 \varphi^2), \quad (9)$$

где  $K_1, K_2$  - коэффициенты аппроксимации; для двигателей АО2 2-6 габарита можно принимать  $K_1=0,45-0,55, K_2=1,0-1,2$ . С учетом (3) условие неперегрева АД может быть записано

$$\beta(\nu) h_{\tau} \geq \rho(1) \frac{\mu^2}{\varphi^2} K_{\text{фн}}^2 + \sigma(1) \frac{\varphi^2}{\nu^2 \alpha(1)} + a_{\text{эм}} \varphi^2 + K_1 \varphi + K_2 \varphi^2, \quad (10)$$

где  $\beta(\nu), h_{\tau}$  - коэффициент изменения теплоотдачи в функции скорости (частоты) и коэффициент греющих потерь в номинальном режиме [1, 2],  $h_{\tau} = 0,7 - 0,8$ .

Уравнение (10) можно решить относительно  $\varphi$  или  $\mu$ . Связь между  $\mu$  и  $\varphi$  определяется из равенства

$$\mu = \varphi^2 \frac{K_{\text{фм}} \mu_{\text{к}}}{\mu_{\text{к}} \varphi}, \quad (11)$$

где  $\mu_{\text{к}}$  - кратность опрокидывающего момента в номинальном режиме;  $\mu_{\text{к}} \varphi$  - требуемый коэффициент статической перегрузаемости на пониженной скорости;  $\mu_{\text{к}} \varphi = \frac{M_{\text{с max}}}{M_{\text{с}}}$ ;

$K_{\text{фм}}$  - отношение максимального момента при регулировании с  $\varphi_{\text{фм}} = \text{const}$  к максимальному моменту в номинальных условиях (рис. 1),  $K_{\text{ф.м}} = \frac{M_{\text{кф}}}{M_{\text{к}}}$ .

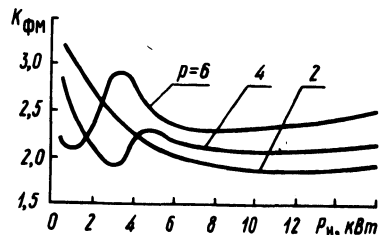


Рис. 1. Коэффициент  $K_{\text{фм}}$  для асинхронных двигателей АО2.

Совместное решение (10) и (11) позволяет в первом приближении определить допустимый по нагреву момент АД в длительном режиме при заданном коэффициенте перегрузки  $\mu_{\text{к}} \varphi$  и частотном регулировании с  $\varphi = \text{const}$ . Требуемый номинальный момент двигателя соответственно равен

$$M_{\text{н}} = \frac{M_{\text{с}}}{\mu}. \quad (12)$$

Расчеты по рассмотренной методике для АД типа АО2-42-6 дают следующие значения:  $\mu = 0,312$ ,  $\varphi = 0,349$  при  $\gamma = 6$ ,  $\mu_{к\varphi} = 1,8$ .

Резюме. Предложена методика расчета первого приближения допустимого момента АД при квазичастотном управлении по закону  $\phi = \text{const}$ .

### Л и т е р а т у р а

1. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М., 1974.
2. Регулируемые асинхронные двигатели в сельскохозяйственном производстве. Под ред. Д.Н. Быстрицкого. М., 1975.
3. Фираго Б.И., Сидоров В.Г. Схема замещения асинхронного двигателя для расчета электромагнитных процессов при несинусоидальном питающем напряжении. - "Изв. ВУЗов СССР. Энергетика", № 3, 1976.
4. Фираго Б.И., Готовский Б.С., Лисс З.А. Тиристорные циклоконверторы. Минск, 1973.

УДК 621.313.3

А.А. Гончар, канд. техн. наук

### О ТЕПЛОМ РЕЖИМЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПОВЫШЕНИИ РАСЧЕТНОЙ ЧАСТОТЫ

Уменьшение веса и габаритов электрооборудования и, в частности, асинхронных двигателей (АД), имеет большое народнохозяйственное значение, так как позволяет рациональнее использовать материалы для их изготовления. Снижение веса АД передвижных установок приводит к уменьшению веса конструкции в целом, что в свою очередь приводит к уменьшению мощности первичного двигателя.

Применение частот выше 50 Гц для автономных установок в ряде случаев приводит к уменьшению веса и габаритов АД, входящих в состав электрической трансмиссии передвижной установки [1].

Наибольший эффект может быть достигнут при неизменных электромагнитных нагрузках: максимальной индукции в воздушном зазоре -  $B_{\delta}$  и линейной нагрузки -  $A$  с увеличением расчетной частоты.

Снижение веса и габаритов АД при их расчете на частоты выше 50 Гц происходит за счет уменьшения потока на полюс, что приводит к уменьшению ширины зубцов, а также к снижению высоты ярма статора и ротора.

АД с меньшими размерами активных частей при неизменной номинальной мощности на валу имеют меньшую площадь охлаждения. Это приводит к увеличению удельных потерь на единицу площади теплосъема.

Приводятся результаты расчетов установившегося теплового режима АД общепромышленного применения на частоты до 200 Гц при неизменной скорости вращения ротора.

Расчеты производились для АД номинальной мощности 10 кВт и  $n_1 = 1500$  об/мин в соответствии с методикой [ 2 ] .

Удельный тепловой поток, приходящийся на  $1 \text{ м}^2$  охлаждающей поверхности статора, возрастает с увеличением расчетной частоты и при частоте 200 Гц составляет  $3,51 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>, в то время как при частоте 50 Гц удельный тепловой поток составляет  $0,742 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>.

Превышение температуры внешней поверхности статора над температурой охлаждающего воздуха составляет  $165^\circ\text{C}$  при частоте 200 Гц по сравнению с  $55^\circ\text{C}$  при частоте 50 Гц.

Средний перегрев обмотки статора над температурой окружающей среды также увеличивается и составляет  $160^\circ\text{C}$  при частоте 200 Гц по сравнению с  $54^\circ\text{C}$  при частоте 50 Гц.

Резюме. Исходя из современного уровня состояния изоляции, можно заключить, что повышение частоты сверх 200 Гц при принятых законах изменения  $V_\delta$  и  $A$  для АД не осуществимо.

#### Л и т е р а т у р а

1. Гончар А.А. О влиянии расчетной частоты тока на размеры асинхронного двигателя. - В.сб.: 2-ая межвуз. конф. по применению высокоскоростных машин с электроприводами повышенной частоты тока в народн. хоз-ве. Орджоникидзе, 1968.
2. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. М., 1970.



В.Г. Черномашенцев, канд. техн. наук,  
В.А. Пацкевич, А.М. Уржумсков,  
Ю.М. Зинин

## БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ ЗАЩИТА ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В работе рассматривается новая схема быстродействующего исполнительного элемента защиты с диодным короткозамыкателем [1], позволяющая практически мгновенно снимать напряжение питания инвертора путем шунтирования его входа, при этом прерывание тока во входной цепи инвертора значительно облегчено. В предлагаемой схеме (рис. 1) исполнительного элемента, помимо увеличения быстродействия, снижены величины напряжений на элементах, что позволяет повысить надежность защиты.

При разработке новой быстродействующей системы защиты основное внимание уделялось снижению количества энергии, выделяющейся в полупроводниковых приборах ТПЧ.

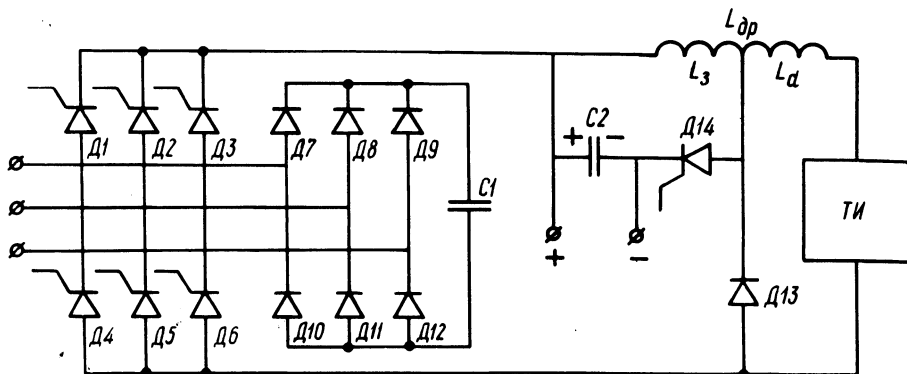


Рис. 1. Принципиальная схема блока питания инвертора с защитой.

Принцип действия исполнительного элемента разработанной системы защиты рассмотрим по схеме рис. 1. В нормальном режиме работы устройства на тиристоры выпрямителя Д1-Д6 подаются отпирающие импульсы. Тиристоры открываются и выпрямленное напряжение через дроссель фильтра  $L_{др}$  подается на тиристорный инвертор (ТИ). Конденсатор С2 заряжен от отдельного источника с полярностью, указанной на рис. 1. Величина напряжения на этом конденсаторе в  $1,2 \div 1,7$  раза превышает выходное напряжение выпрямителя.

В аварийном режиме сигнал от датчика поступает в блок управления выпрямителем и на тиристор Д14 исполнительного устройства защиты. При этом прекращается подача управляющих импульсов на тиристоры Д1-Д6, а тиристор Д14 подключает конденсатор С2 параллельно части дросселя. Так как напряжение на конденсаторе С2 больше выходного напряжения выпрямителя, включается диод Д13 и конденсатор оказывается подключенным параллельно выпрямителю. Диод Д13 шунтирует вход инвертора, при этом прекращается поступление энергии в инвертор. В течение времени, пока напряжение на конденсаторе С2 больше выходного напряжения выпрямителя, тиристоры Д1-Д6 находятся под обратным напряжением и восстанавливают запирающие свойства.

При большой индуктивности питающей сети для повышения быстродействия защиты целесообразно на входе преобразователя подключить диодный мост Д7-Д12, нагруженный на конденсатор С1. Это позволяет устранить затягивание тока через силовой выпрямитель и уменьшить время отключения выпрямителя ТПЧ до  $10 \div 30$  мкс.

Расчет электромагнитных процессов в контуре конденсаторной защиты проведен, исходя из уравнения электрического равновесия, записанного в операторном виде в изображении по Лапласу

$$I_3(p) \left( \frac{1}{pC_3} + pL_3 \right) = \frac{U_3}{p} + I_d L_3,$$

где  $I_3(p)$  - изображение тока собственного контура конденсаторного выключателя;  $U_3$  - начальное напряжение на конденсаторе;  $I_d$  - входной ток инвертора.

Решая данное уравнение, получим выражение для тока контура защиты

$$i_3(t) = \frac{B}{\rho_3} \sin(\omega_3 t + \varphi_3),$$

где

$$\omega_3 = \frac{1}{\sqrt{L_3 C_3}}; \rho_3 = \omega_3 L_3; B = \sqrt{U_3^2 + I_d^2 \rho_3^2};$$

$$\varphi_3 = \arctg \frac{I_d \rho_3}{U_3}.$$

В интервале проводимости тиристора защиты напряжение на конденсаторе определяется уравнением

$$U_c(t) = B [-\cos(\omega_3 t + \varphi_3)].$$

Из последнего уравнения определяем время, предоставляемое на восстановление управляемости тиристоры выпрямителя  $t_0$ , принимая  $u_c(t_0) = U_d$  и  $U_3 = k U_d$

Анализ полученных результатов показывает, что время  $t_0$  зависит от  $k$ ,  $I_d$  и  $\omega_3$ , т.е. от параметров устройства защиты и величины отключаемого тока.

Зависимости времени  $t_0$  от емкости конденсатора защиты при различных значениях  $k$  и  $L_3$  приведены на рис. 2.

Расчитанные графики позволяют определить параметры элементов защиты для ТПЧ мощностью  $60 \div 120$  кВт.

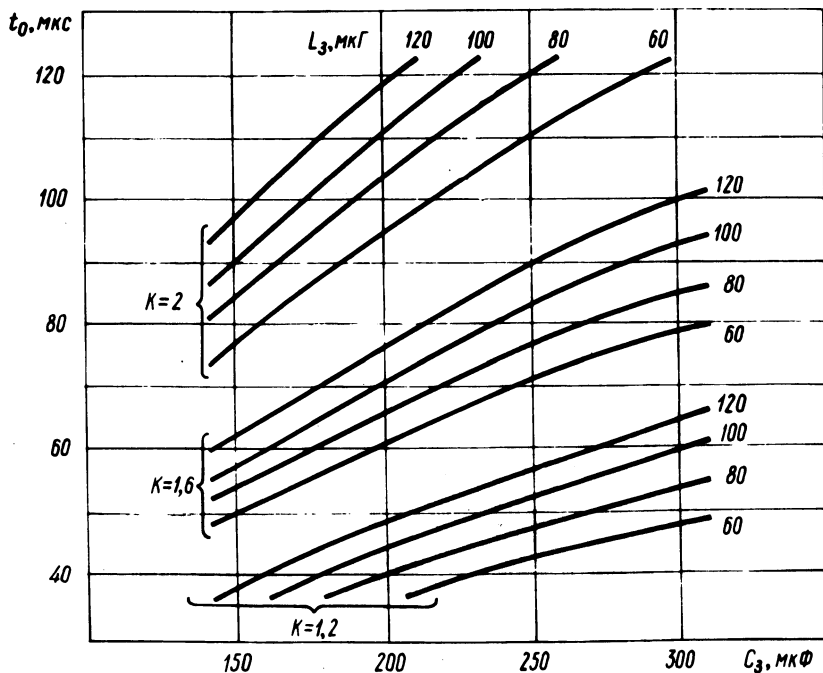


Рис. 2. Зависимость  $t_0$  от параметров устройства защиты.

Зависимости  $t_0$  от коэффициента нагрузки  $\chi = \frac{\rho_3 I_d k}{U_3}$

приведены в [2].

Расчетом определены следующие параметры защиты для ТПЧ мощностью 60 кВт частотой 8000 Гц:  $C_3 = 200$   $\mu\text{Ф}$ ,  $L_3 = 120$   $\mu\text{Г}$ ,  $U_3 = 800$  В. Данные параметры позволяют при отключении тока  $I_d = 120$  А, получить время восстановления  $t_0 = 115$   $\mu\text{с}$ .

Экспериментальные исследования разработанной системы защиты проведены на промышленном образце преобразователя ПЧ-60-8000. Расхождение значений  $t_0$ , полученных экспериментально и расчетным путем, не превышает 10%.

Для проверки надежности работы исполнительного элемента защиты произведено 200 автоматических отключений ТПЧ с интервалом в 1 мин при полной мощности, потребляемой от сети напряжением 3 x 380 В. Случаев отказа или иных повреждений элементов инвертора и конденсаторной защиты не зарегистрировано.

Резюме. Разработанное устройство защиты с диодным короткозамыкателем может применяться для селективного отключения тиристорных преобразователей при их питании от общего выпрямителя. Такое выполнение защиты может оказаться экономически целесообразным. Устройство защиты позволяет уменьшить перенапряжения и токи при возникновении аварийной ситуации. Поэтому рассмотренную схему защиты рекомендуется использовать в ТПЧ электротермических установок для индукционного нагрева металлов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Кацнельсон С.М., Зимин Ю.М., Иванов А.В. и др. Устройство защиты источника питания. - Авт. свид. № 481964. - Бюлл. изобр., 1975, № 31.
2. Забродин Ю.С. Узлы принудительной конденсаторной коммутации тиристорov. М., 1974.

УДК 62 - 83 : : 621.313.3 - 532.3

А.И. Лapidус, канд. техн. наук

### ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ ДВУХСКОРОСТНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В электроприводах высокопроизводительных механизмов часто требуется интенсивное торможение и точная остановка перемещающихся узлов. Если цикл механизма состоит из движений, сопровождающихся двухкратным изменением скорости, то в этих случаях применяется электропривод с двухскоростным асинхронным двигателем. Для такого электропривода трудности в реализации требований быстрой и точной остановки возникают только при торможении с низкой скорости, так как переход с высокой скорости на низкую за счет удвоения

числа пар полюсов машины легко осуществляется интенсивным рекуперативным торможением. Переход с высокой скорости на низкую достигается переключением обмотки статора со схемы "двойная звезда - треугольник".

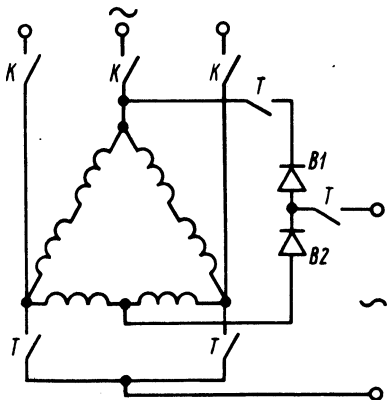


Рис. 1. Схема торможения.

Была разработана схема [1], позволяющая тормозить двухскоростной двигатель с меньшей скорости до полной остановки (рис. 1). Тормозной контактор Т включается сразу после отключения рабочего контактора К, чтобы использовать энергию магнитного поля, запасенную в машине во время вращения на рабочей скорости. Это затухающее магнитное поле сцеплено с замкнутыми контурами [2], образованными из обмоток статора и вентилей В1 и В2. Возникающие в контурах э.д.с. и обусловленные ими токи приводят к созданию в области высоких скоростей значительного тормозного момента, в несколько раз превышающего номинальный момент двигателя. Качественно оценить пик этого момента можно по приближенной формуле [3]

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

где  $M_k$  - критический момент двигателя по статической характеристике;  $V_o$  - коэффициент, характеризующий степень уменьшения наведенной э.д.с. 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.

В области средних и низких скоростей основное значение в создании тормозного эффекта приобретает динамическое торможение. Половину периода питающего напряжения ток из сети течет через один из вентилялей и две фазные обмотки статора, а вторую половину периода – через другой вентиль и две половины третьей фазной обмотки. В течение обоих полупериодов вентили В1 и В2 создают короткозамкнутые контуры, по которым (вследствие действия э.д.с. электромагнитной индукции) продолжает протекать тормозной ток прежнего направления, сглаживая пульсации этого тока и увеличивая тем самым его постоянную составляющую, а следовательно, и интенсивность торможения.

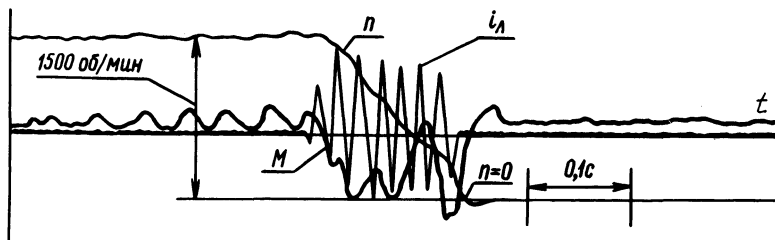


Рис. 2. Осциллограмма торможения двигателя АОЛ2-21-4/2.

Распространенные схемы динамического торможения требуют отдельного источника питания постоянного тока с напряжением, значительно более низким, чем напряжение сети. В схеме (рис. 1) пониженное напряжение обеспечивается тем, что тормозное устройство включается на фазное напряжение сети и что на каждую обмотку двигателя подается напряжение, выпрямленное по однополупериодной схеме, равное

$$U_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\lambda} U_m \sin \omega t d \omega t = \frac{U_m}{2\pi} (1 - \cos \lambda), \quad (2)$$

где угол  $\lambda$  соответствует открытому состоянию вентиля.

На рис. 2 представлена осциллограмма торможения двигателя АОЛ2-21-4/2 мощностью  $P = 0,7/0,9$  кВт, включенного в рабочий режим по схеме "треугольник". Осциллографировались частота вращения ротора  $n$ , ток в линейном проводе  $i_L$  и момент  $M$ . Из осциллограммы видно, что двигатель затормозился до полной остановки за 0,15 с. Такая высокая интенсивность торможения обусловлена тем, что в области высоких скоростей действует составляющая момента короткого замыкания, а в области низких скоростей – составляющая момента динамического торможения.

Рассматриваемая схема позволяет тормозить двухскоростной двигатель и в том случае, если перед остановкой он работал на высокой скорости. Для этого в момент поступления команды на торможение обмотки статора снова включаются по схеме треугольник, а с помощью вентиля и тормозного контактора Т тормозное устройство подключается к сети.

Исследуемая схема применена в электроприводе боковых транспортеров транспортного устройства "спутникового" типа ряда автоматических линий, изготовленных на Минском заводе автоматических линий. Боковые транспортеры предназначены для перемещения приспособлений - "спутников" на рабочий и возвратный транспортеры. Перевод "спутника с одного транспортера на другой возможен только при точном его останове на переводной площадке, что достигается торможением двигателя при подходе бокового транспортера к исходной позиции.

Резюме. Разработанная схема индукционно-динамического торможения двухскоростных асинхронных двигателей обеспечивает высокую интенсивность торможения и может быть рекомендована для применения в электроприводах станков и других производственных механизмов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Каплан Н.А., Лapidус А.И. Устройство для динамического торможения асинхронного двигателя. - Авт. свид. № 445973. - "Бюлл. изобр.", 1974, № 37.
2. Лapidус А.И. Индукционно-динамическое торможение асинхронных двигателей в станочных электроприводах. - В сб.: Электротехническая промышленность, сер. "Электропривод", 1975, № 4.
3. Соколов М.М. и др. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе. М., 1967.

УДК 621.365

Л.С. Герасимович, канд. техн. наук,  
Л.П. Яновский

### ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

На предприятиях приборостроительной промышленности ряд технологических процессов требует нагрева до температуры 70 - 150°С. К ним можно отнести сушку деталей после про-

мывки, подогрев электролитов, химреактивов, растворов, масла, нагрев пресс-форм для прессования пластмасс и др.

Низкотемпературный электронагрев при всей кажущейся простоте его выполнения с помощью протяженных электронагревателей обладает существенными недостатками. Главными из них являются: низкий к.п.д. использования электроэнергии, недостаточная равномерность нагрева, невысокий срок службы (500 – 3000 ч), малая скорость нагрева, высокая пожаро- и взрывоопасность, усложнение и удорожание конструкции при необходимости равномерного нагрева деталей развитой конфигурации.

Одним из перспективных путей совершенствования процессов низкотемпературного электронагрева является оборудование технологических установок полупроводниковыми пленочными электронагревателями [1].

Пленочный нагреватель имеет развитую поверхность нагрева, что является основной особенностью и преимуществом такого метода электронагрева.

Для изоляции корпуса установки от пленки наиболее перспективными материалами являются стеклоэмалевые покрытия высокотемпературного обжига.

Таблица 1. Технические характеристики низкотемпературных установок с пленочными электронагревателями

Технические показатели	Наименование установки			
	гальваническая ванна ВПО-1	электроемкость для подогрева растворов		панель для сушки часовых деталей
		3 л	6 л	
Напряжение, В	220	220	220	220
Мощность, кВт		0,3	0,4	0,15
разогрева	3,72			
рабочая	1,78			
Удельная мощность электронагревательного элемента, Вт/см <sup>2</sup>	2,07 и 0,61	2,0	2,7	0,35
Масса подогреваемого раствора (деталей), кг	50	3	6	0,2-0,3
Конечная температура, °С	76	70	70	120
Время разогрева, мин	58	33	42	20



Применение стеклоэмалевой изоляции позволяет использовать недорогие конструкционные стали и гарантирует долговечность, термостойкость и антикоррозионную стойкость установок, обеспечивает высокие санитарно-гигиенические условия эксплуатации.

В качестве материала электронагревательной пленки разработан состав, получаемый в результате химического соединения ферросилиция с раствором силиката натрия (жидким стеклом). Контактные электроды выполняются латунными и наносятся на пленку методом электрометаллизации. Сверху пленочный элемент защищается теплостойким гидрофобным кремнийорганическим покрытием.

На базе описанной конструктивной схемы Минским часовым заводом исследован и внедрен ряд низкотемпературных электронагревательных установок для различных технологических процессов, разработанных в Белорусском институте механизации сельского хозяйства. Технические характеристики установок представлены в табл. 1.

В сравнении с существующими фарфоровыми ваннами время разогрева ванны ВПО-1 сокращается в 2 - 2,5 раза, расход электроэнергии сокращен на 10%, производительность гальванического процесса повышается в среднем на 10%. Годовой экономический эффект от внедрения одной ванны ВПО-1 составляет около 780 руб.

Более чем двухлетний опыт эксплуатации ванн показал, что их срок службы обусловлен химической устойчивостью стеклоэмали к разрушающему действию электролита. Для повышения эффективности ванн с пленочным обогревом необходимо использование щелочеустойчивых стеклоэмалей.

В промысловых отделениях цехов применяют электронагрев обезжиривающих растворов и химических реактивов в эмалированных кастрюлях. Нагрев кастрюль производят на общих групповых электроплитах. Размеры поверхности плиты 0,8 х х 0,6 м<sup>2</sup>, мощность закрытых спиральных нихромовых элементов составляет 2,5 - 7 кВт. Такой вид электронагрева имеет существенные недостатки: время нагрева кастрюль слишком велико (50 - 80 мин); особую пожаро- и взрывоопасность представляет повышенная температура негерметизированных спиральных нагревателей.

Электрообогреваемая емкость выполнена на базе стандартных трех- и шестилитровых эмалированных кастрюль. Пленочный электронагреватель нанесен на дно кастрюль в виде двух

последовательно соединенных участков. Защита нагревателя от механических воздействий и возможных прикосновений обслуживающего персонала выполнена с помощью металлического поддона, который крепится ко дну кастрюли. Токоподвод к контактным электродам выполнен гибким кабелем с трехштырьковой вилкой. При этом третья жила кабеля использована для защитного заземления корпуса и поддона.

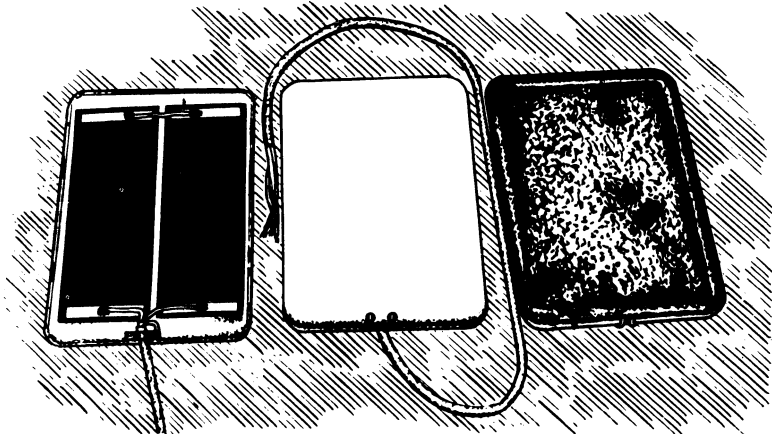


Рис. 1. Виды панели для сушки мелких часовых деталей.

Опыт эксплуатации разработанных устройств показал, что для промывки целесообразно использовать трехлитровые емкости мощностью 270 - 320 Вт, а шестилитровые - 350 - 420 Вт. При этом возрастает производительность труда, так как время нагрева растворов уменьшается в 1,5 - 2 раза, а установленная мощность и расход электроэнергии снижаются в 2,5 - 4,5 раза.

В процессе эксплуатации установлено, что часть емкостей с пленочными электронагревателями, нанесенными на бытовые эмалевые покрытия, оказываются недостаточно стойкими по причине разрушения эмали. В настоящее время ведутся работы по подбору химически и электроизоляционно стойких эмалевых покрытий, обеспечивающих необходимую надежность.

Применение сушильных панелей с пленочными электронагревателями для контактного нагрева часовых деталей вместо инфракрасных ламп позволило в 4,8 раза снизить мощность и расход электроэнергии. Это дало возможность в 8 раз уменьшить эксплуатационные затраты.

Сушильная панель (рис. 1) представляет собой эмалированный металлический лист площадью 0,105 м<sup>2</sup> с бортами

высотой до 10 мм, загнутыми книзу. Пленочный электронагреватель расположен на нижней поверхности панели в виде двух последовательно соединенных полос. Снизу нагреватель защищен теплостойкой резиновой пластиной толщиной 1 мм. Токосвод выполнен аналогично электрообогреваемым емкостям.

Панели весьма эффективны для сушки мелких деталей, особенно при использовании фильтровальной бумаги, на которой размещают детали россыпью при сушке на панелях. Время сушки сокращается при этом более чем в 2 раза. На замену каждой лампы ИКЗ-500 сушильной панелью завод экономит до 20 рублей в год.

Аналитическая обработка опытных данных позволила получить эмпирическую формулу расчетного срока службы пленочного нагревателя в зависимости от начальной удельной поверхностной мощности и допустимого снижения мощности (в %) к концу эксплуатации установки.

$$T_{\text{сл}} = 148,5 \cdot \Delta P_{\%} W_{\text{уд}}^{-1,39} \quad (1)$$

где  $T_{\text{сл}}$  – расчетный срок службы, ч;  $\Delta P_{\%}$  – допустимое снижение мощности, %;  $W_{\text{уд}}$  – начальная удельная поверхностная мощность, Вт/см<sup>2</sup>.

Резюме. Экономический эффект от внедрения на Минском часовом заводе, разработанных и изготовленных в БИМСХ, более сотни электрообогреваемых емкостей и сушильных панелей составит около 17 тысяч рублей, а экономия электроэнергии около 209800 кВт·ч в год.

#### Л и т е р а т у р а

1. Кудрявцев И.Ф., Герасимович Л.С. Полупроводниковые пленочные электронагреватели в сельском хозяйстве. Минск, 1973.

УДК 621.314.263

В.И. Можар

#### РАСЧЕТ АМПЛИТУДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОРЕЗОНАНСНОГО ФОРМИРОВАТЕЛЯ ИМПУЛЬСОВ

Для питания систем телеуправления, работающих от сети с частотой 50 Гц или 400 Гц применяются феррорезонансные формирователи импульсов (ФФИ) [1]. Схема этого ФФИ при-

ведена на рис. 1. Так как в каждый полупериод работает только один из вентиляй, то для расчета схема ФФИ может быть заменена эквивалентной схемой, состоящей из последовательно соединенных: нелинейного дросселя  $i(\psi)$ , емкости  $C$  и эквивалентного активного сопротивления  $R_{\text{э}}$ :

$$R_{\text{э}} = R_{\text{др}} + R_{\text{в}} + R_{\text{н}} + R_{\text{д}},$$

где  $R_{\text{др}}$  - активное сопротивление нелинейного дросселя;

$R_{\text{в}} = R_{\text{в1}} = R_{\text{в2}}$  - сопротивление вентиля;  $R_{\text{н}} =$

$R_{\text{н1}} = R_{\text{н2}}$  - сопротивление нагрузки;  $R_{\text{д}}$  - добавочное сопротивление.

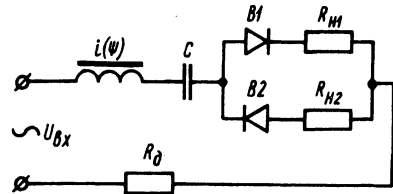


Рис.1. Схема феррорезонансного формирователя импульсов.

Установившиеся процессы в такой схеме описываются дифференциальным уравнением типа Картрайт - Литлвуда, которое в относительных единицах при аппроксимации характеристики нелинейного элемента гиперболическим синусом примет вид

$$\frac{d^2 \psi}{d\tau^2} + R_{\text{э}} \operatorname{ch} \psi \frac{d\psi}{d\tau} + \frac{1}{C} \operatorname{sh} \psi = U_{\text{мвх}} \cos \tau. \quad (1)$$

Расчет комплексных амплитуд гармонических составляющих потокосцепления нелинейного дросселя выполним по методике, изложенной в [2]. Задаваясь значениями первой гармонической  $\psi_{1m}$ , определяем высшие гармонические потокосцепления по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi}_{3m} &= \frac{\left(\frac{1}{C} + j3R_{\text{э}}\right) \dot{A}_{3m} + \frac{1}{C} \left(\dot{\psi}_{3m} \dot{D}_{6m} + \dot{\psi}_{5m} \dot{D}_{2m} + \dots\right)}{9 - D_0 \left(\frac{1}{C} + j3R_{\text{э}}\right)} \\ \dot{\psi}_{5m} &= \frac{\left(\frac{1}{C} + j5R_{\text{э}}\right) \dot{A}_{5m} + \frac{1}{C} \left(\dot{\psi}_{3m} \dot{D}_{2m} + \dot{\psi}_{3m} \dot{D}_{8m} + \dots\right)}{25 - D_0 \left(\frac{1}{C} + j5R_{\text{э}}\right)} \\ &\dots \end{aligned} \right\} (2)$$

Здесь коэффициенты  $A_{km}$  и  $D_{km}$  определяются как результат разложения  $\text{sh}(\psi_{1m} \cos \tau)$  и  $\text{ch}(\psi_{1m} \cos \tau)$  в ряд Фурье. В первом приближении пренебрегаем влиянием высших гармонических на низшие и сопряженным комплексом искомой величины, тогда система уравнений (2) станет рекуррентной. Причем для получения достаточной для инженерных расчетов точности сумма высших гармонических не должна превышать 10% от основной гармонической.

Затем определяем напряжение на входе схемы, которое соответствует заданной величине  $\psi_{1m}$ , по формуле

$$\dot{U}_{mвх} = -\dot{\psi}_{1m} + \left( \frac{1}{C} + jR_{\text{э}} \right) \dot{A}_{1m} + \frac{1}{C} (\dot{\psi}_{3m} D_{2m}^* + \dot{\psi}_{3m}^* D_{4m} + \dots).$$

Первая гармоническая составляющая тока в эквивалентной расчетной схеме ФФИ в относительных единицах будет равна

$$\dot{I}_{1m} = \frac{\dot{U}_{mвх} - \dot{U}_{1мдр}}{R_{\text{э}} - j \frac{1}{C}} = \frac{\dot{U}_{mвх} - j \dot{\psi}_{1m}}{R_{\text{э}} - j \frac{1}{C}}.$$

Нелинейный элемент является генератором э.д.с. высших гармонических ( $E_k$ ), поэтому  $k$ -ая гармоническая составляющая тока, протекающего в эквивалентной схеме, будет равна

$$\dot{I}_{km} = \frac{\dot{E}_{km}}{R_{\text{э}} - j \frac{1}{kC}} = \frac{-jk \dot{\psi}_{km}}{R_{\text{э}} - j \frac{1}{kC}}.$$

Затем графически или численно по найденным значениям первой и высших гармонических составляющих тока получаем амплитуду несинусоидальной кривой тока, протекающего в эквивалентной схеме. Амплитуда же импульса, появляющегося в зависимости от полупериода в нагрузке  $R_{н1}$  или  $R_{н2}$ , численно будет равна амплитуде несинусоидального тока в эквивалентной расчетной схеме, т.е. можно построить зависимость амплитуды импульса тока ФФИ от амплитуды входного напряжения при данных параметрах схемы.

В тех случаях, когда сумма высших гармонических превышает 10% от основной гармонической, следует воспользоваться итерационным методом [3]. В этом случае, задаваясь  $\psi_{1m}$ , будем определять приращения к высшим гармоническим по формулам

$$\Delta \dot{\psi}_{3m}^{(\lambda+1)} = \frac{-9 \dot{\psi}_{3m}^{(\lambda)} + \left(\frac{1}{C} + j3R_{\vartheta}\right) \dot{A}_{3m} + \frac{1}{C} (\Delta \dot{\psi}_{3m}^{*(\lambda)} \dot{D}_{6m} + \dots)}{9 - D_0 \left(\frac{1}{C} + j3R_{\vartheta}\right)}$$

$$\Delta \dot{\psi}_{5m}^{(\lambda+1)} = \frac{-25 \dot{\psi}_{5m}^{(\lambda)} + \left(\frac{1}{C} + j5R_{\vartheta}\right) \dot{A}_{5m} + \frac{1}{C} (\Delta \dot{\psi}_{3m}^{(\lambda+1)} \dot{D}_{2m} + \dots)}{25 - D_0 \left(\frac{1}{C} + j5R_{\vartheta}\right)}$$

$$\dots$$

где  $(\lambda)$  и  $(\lambda + 1)$  указывают на порядковый номер итерации. А сами величины высших гармонических составляющих потокосцепления определим по формулам:

$$\dot{\psi}_{3m}^{(\lambda+1)} = \dot{\psi}_{3m}^{(\lambda)} + \Delta \dot{\psi}_{3m}^{(\lambda+1)}$$

$$\dot{\psi}_{5m}^{(\lambda+1)} = \dot{\psi}_{5m}^{(\lambda)} + \Delta \dot{\psi}_{5m}^{(\lambda+1)}$$

.....

В остальном же порядок расчета амплитудных характеристик ФФИ останется тем же.

Резюме. Предложена инженерная методика расчета амплитудных характеристик ФФИ.

### Л и т е р а т у р а

1. Миловзоров В.П. Электромагнитные устройства автоматизации. М., 1974.
2. Можар В.И. Расчет нелинейных электрических цепей, описываемых уравнением типа Картрайт-Литлвуда. Рук. деп. в ОВНИИЭМ, № 94-д/76. РЖ (ВИНИТИ) "Электротехника и энергетика", 1976, № 11, 11А52ДЕП.
3. Bladyko W.M., Moshar W.I. Die iterative Methode bei der harmonischen Analyse in Ferroresonanzkreisen. XX. Intern. Wiss. Koll. TH Шменау 1975, Heft 2.

## АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ВНЕШНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Была предложена методика расчета внешних характеристик трансформатора-преобразователя частоты методом разложения по малому параметру с использованием итераций [1].

Ниже приводится алгоритм расчета внешних характеристик трансформатора-преобразователя частоты при поперечной емкостной компенсации с учетом потерь на вихревые токи, блок-схема которого приведена на рис. 1.

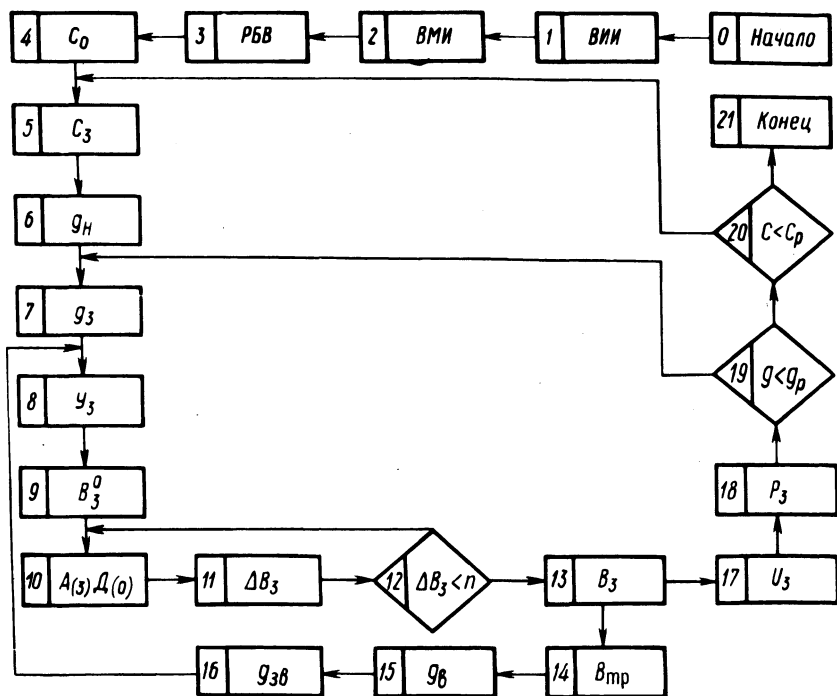


Рис. 1. Блок-схема программы расчета внешних характеристик: ВИИ – ввод исходной информации; ВМИ – ввод массива информации; РБВ – расчет базисных величин.

Все расчеты ведутся в относительных единицах, пренебрегая 9-ой гармоникой.

Первое приближение индукции третьей гармоники для схемы замещения (рис. 2) находим по формуле

$$\dot{B}_3^0 = - \frac{\dot{A}_3}{\dot{D}_0 + j3Y_3} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Здесь } \dot{A}_3 = 2 \left[ \dot{i}_{01} \dot{i}_{13} + \dot{i}_{31} \dot{i}_{03} + \dot{i}_{31}^* \dot{i}_{23} + \dot{i}_{61} \dot{i}_{13}^* + \right. \\ \left. + \dot{i}_{61}^* \dot{i}_{33} + \dot{i}_{91} \dot{i}_{43} \right]; \\ \dot{D}_0 = \dot{i}_{01} \dot{i}_{03} + 2 \left[ \dot{i}_{31} \dot{i}_{13}^* + \dot{i}_{61} \dot{i}_{23}^* + \dot{i}_{91} \dot{i}_{33}^* \right], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $Y_3$  - полная проводимость нагрузки;  $I_{кр} = I_{кр}(B_p)$  - модифицированные функции Бесселя.

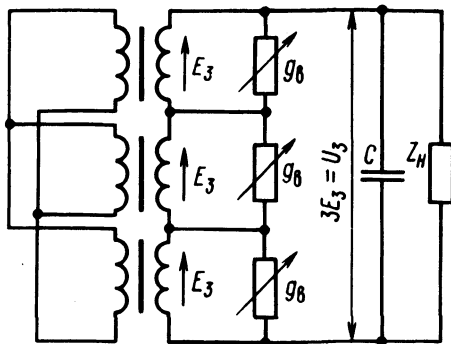


Рис. 2. Схема замещения трансформатора-преобразователя частоты для третьих гармоник.

Следующее приближение находим по формуле

$$\dot{B}_3^1 = B_3^0 + \Delta \dot{B}_3^1 \quad (3)$$

$$\text{где } \Delta B_3 = - \frac{j3\dot{B}_3^0 Y_3 + \dot{A}_3}{\dot{D}_0 + j3Y_3}.$$

Процесс расчета повторяем до тех пор, пока  $\Delta B_3$  не станет равным заданному значению.

Проводимость, обусловленная потерями на вихревые токи при расчетной индукции  $B_{mp}$ , которая определяется с учетом найденного значения индукции третьей гармоники

$$g_B = \frac{2 \gamma_{ст} P_{об} \beta}{\omega B_{mp}^2} \quad (5)$$

где  $\gamma_{ст}$  - удельный вес материала сердечника;  $P_{об}$  - удельные потери на вихревые токи при синусоидальной индукции с амплитудой  $B_{1m} = B_{mp}$ .



Приведенная вихревая проводимость

$$g_{зв} = \left( \frac{2 W_1}{W_3} \right)^2 g_B, \quad (6)$$

где  $W_1$ ,  $W_3$  - число витков первичной и вторичной обмоток.

Полная проводимость нагрузки с учетом вихревой проводимости

$$y'_3 = y_3 + g_{зв}. \quad (7)$$

По формулам (1) - (4) расчет повторяется для нового значения полной проводимости нагрузки.

Действующее значение напряжения третьей гармоники определяется по формуле

$$U_3 = 3 \cdot V_3 \frac{U_6}{\sqrt{2}}$$

где  $U_6$  - базисное напряжение.

Мощность, потребляемая нагрузкой, определяется по выражению

$$P_3 = U_3^2 g_H.$$

Данные трансформатора-преобразователя частоты (рис. 2), такие как: сечение, число витков обмоток, базисная частота вводятся в ЭВМ в качестве исходной информации (ВИИ, блок 1). Блок 2 (ВМИ) описывает массив информации: индукцию основной частоты  $V_{1m}$  и коэффициенты аппроксимации  $\alpha$ ,  $\beta$ . Исходя из этих данных производится расчет базисных величин: сопротивления  $x_6$ , емкости  $C_0$  (РВВ, блок 3), проводимостей емкости  $C_3$  (блок 5) и нагрузки  $g_3$  (блок 7) в относительных единицах по заданным начальным значениям поперечной компенсации  $C_0$  (блок 4) и проводимости нагрузки  $g_H$  (блок 6). По рассчитанным значениям  $C_3$  и  $g_3$  определяется полная проводимость нагрузки  $y_3$  (блок 8).

Следующим этапом является определение первого приближения индукции третьей гармоники  $\dot{V}_3^0$  (1) и последующих приближений (3) (блок 11). Расчет модифицированных функций Бесселя от  $V_1$  и  $V_3$  для определения коэффициентов  $A_3, D_0$  (блок 10) выведен в отдельную подпрограмму. Процесс расчета  $\Delta V_3$  (4) повторяется по циклу (12-10-11-12) до тех пор, пока  $\Delta V_3$  не станет меньше ранее заданной величины. После определения  $V_3$  (блок 13) производится расчет

амплитуды результирующей индукции  $B_{mp}$  (блок 14), а по формуле (5) определяется вихревая проводимость  $g_v$  (блок 15) и приведенная к виткам обмотки третьей гармоники вихревая проводимость  $g_{3v}$  (блок 16). В последующем расчет повторяется до определения нового значения  $B_3$  с учетом потерь на вихревые токи. Определенное в результате расчета значение напряжения третьей гармоники  $U_3$  (блок 17) и мощности  $P_3$  (блок 18) выводится на печать.

Для других значений проводимости нагрузки, меньших  $g_p$  (блок 19), расчет повторяется с блока 7, а для других значений емкости (блок 20) - с блока 5.

Резюме. Представленный алгоритм пригоден для расчета внешних характеристик трансформатора-преобразователя частоты при поперечной емкостной компенсации с учетом потерь на вихревые токи.

#### Л и т е р а т у р а

1. Бладыко В.М., Сончик Л.И., Мехедко В.Ф. Исследование работы трансформатора-преобразователя частоты с витым пространственным магнитопроводом. - В сб.: Тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. конф. "Современные задачи преобразовательной техники", вып. 3. Киев, 1975.

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

### Решения XXV съезда КПСС в жизнь

Малевиц Ю.А., Ганжин А.А., Никонов А.Р. Использование топливно-энергетических ресурсов в БССР . . . . .	3
---	---

#### Теплоэнергетика

Шпорта И.П., Кнотько П.Н., Яковлев Б.В., Трутаев В.И. Роль Белорусского отделения ВНИПИэнергопрома в решении проблем современной энергетики . . . . .	10
Качан А.Д., Леонков А.М., Шишея П.Н. К вопросу распределения нагрузок на ТЭЦ, 15	
Даценко В.Г. Влияние режима работы теплофикационных турбин на конечную влажность пара . . . . .	19
Шербяч В.И., Баубель Л.А. О расчете показателей изменения экономичности турбоагрегатов в АСУ ТП . . . . .	22
Северянин В.С. Особенности аэродинамики камер пульсирующего горения . . . . .	25
Степанчук В.Ф., Мигуцкий Е.Г. Экспериментальное исследование теплообмена в двухфазных водо-воздушных потоках . . . . .	29
Степанчук В.Ф., Гурис М.Л. К теории кипения . . . . .	31
Заватко А.М., Тарасевич Л.И., Фатеев Г.А. Моделирование реакционного теплообмена при термической обработке плотного слоя в режиме тепловых волн . . . . .	33
Иванистов А.Н., Кабалдин Г.С. Анализ и расчет норм расхода топлива в процессах сушки . . . . .	38
Темкин Л.И., Несенчук А.П. Охлаждение формовочного песка в вихревом потоке теплоносителя . . . . .	40
Сомова С.В., Несенчук А.П. Определение изостерической теплоты адсорбции синтетических цеолитов . . . . .	43

#### Электроэнергетика

Поспелов Г.Е., Федин В.Т. Об учете распределенности параметров криогенных линий в электрических расчетах . . . . .	46
Прокопенко В.Г. Учет потерь на корону при планировании режимов работы электрических сетей 110-750 кВ по напряжению и реактивной мощности . . . . .	49
Поспелов Е.Г. Об учете коронирования проводов при оптимизации установившихся режимов линии электропередачи . . . . .	52
Иванова С.Н., Гончарик Е.П. Методика расчета токов, стекающих с автомобилей на землю, в зоне влияния воздушных линий сверхвысокого напряжения . . . . .	54
Падалко Л.П., Нагорнов В.Н. О принципах выбора оптимальной структуры генерирующих мощностей в энергетической системе . . . . .	57
Петров В.В., Белоусова Р.И. Расчет коррекции установившегося режима энергосистемы . . . . .	61
Калентиюнок Е.В., Файбисович В.А. Особенности протекания переходных процессов в системе собственных нужд электростанций в аварийных условиях . . . . .	66
Фальковский О.В. Основная концепция автоматизированной системы проектирования (АСП) с учетом существующей технологии проектирования электросетевых объектов . . . . .	68
Поспелова Т.Г., Запатрин Р.И. Некоторые положения по построению информационного обеспечения АСУ энергосистемами . . . . .	71
Урбанович В.С. Алгоритмы ввода и корректировки массивов нормативно-справочной информации на МД по электросетевому оборудованию . . . . .	73
Губанович А.Г. Геометрия лобовой дуги обмотки статора турбогенератора с учетом размеров поперечного сечения стержня обмотки . . . . .	77
Глинский Е.В., Тишечкин А.А. Методика выбора уставок дифференциальных защит понижающих двухобмоточных трансформаторов на ЦВМ . . . . .	80
Свита Л.Н. Исследование работоспособности диффузной высокочастотной защиты с расположением информационных органов под рабочим потенциалом ЛЭП . . . . .	83
Чаплина А.И. О прогнозировании надежности . . . . .	87
Травянский М.И. Оценка надежности работы оборудования трансформаторных подстанций 6 кВ . . . . .	90
Ржевская С.П. Исследование электропроводности многотитановых стекол . . . . .	92

## Электрооборудование промышленных установок

Анхимюк В.Л., Новицкая В.А. Математическая модель замкнутой системы тиристорного электропривода постоянного тока . . . . .	96
Анхимюк В.Л., Слуга М.П. Оптимизация структуры и параметров системы стабилизации частоты вращения с фазовым дискриминатором . . . . .	98
Михеев Н.Н., Раткевич Е.П. Приближенная методика построения статических характеристик вентиляльных приводов . . . . .	102
Михеев Н.Н., Сацукевич В.Н., Раткевич Е.П. О составлении передаточных функций по структурной схеме системы управления . . . . .	105
Ильин О.П., Примшиц П.П. Синтез эталонной модели для управления объектом автоматического регулирования с переменными параметрами . . . . .	108
Ползик П.В., Максимов В.Я. Формирование управляющего воздействия в системе управления электроприводом подачи в деревообработке . . . . .	112
Парфенович О.Н., Слуга М.П. Тиристорный электропривод прядильных машин . . . . .	117
Фираго Б.И., Сидоров В.Г. Допустимый момент асинхронного двигателя при квазичастотном управлении . . . . .	119
Гончар А.А. О тепловом режиме асинхронных двигателей при повышении расчетной частоты . . . . .	123
Черномашенцев В.Г., Пацкевич В.А., Уржумсков А.М., Зинин Ю.М. Быстродействующая защита тиристорного преобразователя . . . . .	125
Липидус А.И. Индукционно-динамическое торможение двухскоростных асинхронных двигателей . . . . .	128
Герасимович Л.С., Яновский Л.П. Применение полупроводниковых пленочных электронагревателей для низкотемпературных технологических процессов . . . . .	131
Можар В.И. Расчет амплитудных характеристик феррорезонансного формирователя импульсов . . . . .	135
Сончик Л.И. Алгоритм расчета внешних характеристик трансформатора-преобразователя частоты . . . . .	139



## РЕФЕРАТЫ

УДК 621.039:621.311: 697.3

Использование топливно-энергетических ресурсов в БССР. Малевич Ю.А., Ганжин А.А., Никитин А.Р. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с.3-9.

Показана эффективность использования топливно-энергетических ресурсов в БССР. Приведены данные по оценке использования отдельных видов топлива и энергии в промышленности, в том числе отдельно показано использование вторичных энергетических ресурсов. - Табл. 4.

УДК 620.9:621.039:621.311.22:697.3.003 (045)

Роль белорусского отделения ВНИПИэнергопрома в решении проблем современной энергетики. Шпорта И.П., Кнотыко П.Н., Яковлев Б.В., Трутаев В.И. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с.10-15.

Излагается развитие и основные результаты проектных и научно-исследовательских работ, проводимых в Белорусском отделении ВНИПИэнергопром, показаны значимость и народнохозяйственная эффективность этих работ, сформулированы основные направления деятельности отделения на перспективу.

УДК 621.165.003,13

К вопросу распределения нагрузок на ТЭЦ. Качан А.Д., Леонков А.М., Шишеев П.Н. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 15-18.

Приведен метод распределения нагрузок на ТЭЦ, основанный на последовательном распределении электрических и тепловых нагрузок из условия достижения минимального расхода тепла (топлива) на ТЭЦ. Показана возможность распределения электрических (конденсационных) нагрузок при любом характере расходных характеристик методом "совмещения характеристик". - Ил. 2. Библ. 3.

УДК 621.165

Влияние режима работы теплофикационных турбин на конечную влажность пара. Давиденко В.Г. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 19-21.

Рассматривается возможность работы теплофикационных турбин Т-100-130 и ПТ-60-130/13 без ухудшения вакуума в широком диапазоне нагрузок при уменьшении начальной температуры пара. - Ил. 1. Библ. 1.

УДК 621.165:621.186.2,001.42

О расчете показателей изменения экономичности турбоагрегатов в АСУ ТП. Шербич В.И., Баульбаев Л.А. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып.5, с. 22-25.

Показано, что в алгоритмах анализа технико-экономических показателей при расчете поправок к расходу тепла по регенеративным изменениям тепловой схемы необходимо учитывать фактические значения параметров, влияющих на энтальпию пара в отборах, в начальных и конечных точках процесса расширения. В первую очередь необходимо учитывать фактическое давление пара в конденсаторе. - Ил. 1. Табл. 1. Библ. 1.

УДК 621.039.554

Особенности аэродинамики камер пульсирующего горения. Северянин В.С. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 25-29.

Показаны конструкции и дается классификация клапанных систем устройств пульсирующего горения. Предлагаются величины (вентильный эффект, аэродинамический параметр и др.), характеризующие работу устройств. Описывается аэродинамическая модель. - Ил. 3.

УДК 536.246

Экспериментальное исследование теплообмена в двухфазных водо-воздушных потоках. Степанчук В.Ф., Мигуцкий Е.Г. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 29-31.

Показана возможность использования двухфазных водо-воздушных потоков в теплообменниках вместо однофазных воздушных и даны результаты экспериментального исследования. Приведены уравнения для расчета коэффициента теплоотдачи и среднего критического температурного напора. - Библ. 2.

УДК 621.1.016.4

К теории кипения. Степанчук В.Ф., Гурис М.Л. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 31-33.

Показано, что учет зависимости удельного объема от давления для паровой фазы в известном уравнении Я.И. Френкеля снижает перегрев, обеспечивающий заметную скорость вскипания, до  $45^{\circ}\text{C}$ . - Библ. 1.

УДК 536.244

Моделирование реакционного теплообмена при термической обработке плотного слоя в режиме тепловых волн. Заватко А.М., Тарасевич Л.И., Фатеев Г.А. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 33-37.

Разработана методика расчета параметров саморегулируемого источника тепла, моделирующего условия реакционного резонансного теплообмена в слое. Выполнен расчет для температурных условий, соответствующих технологии регенерации насыщенного слоя адсорбента. - Ил. 4. Библ. 7.

УДК 66.047:519.24:058.262 001.2 (045)

Анализ и расчет норм расхода топлива в процессах сушки. Иванистов А.Н., Кабалдин Г.С. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 38-40.

Проведен анализ расхода топлива от основных факторов процесса сушки с использованием метода планирования эксперимента. Получена конкретная зависимость  $b = f(G, w_1, A, T_1)$  для расчета удельных норм расхода топлива. - Табл. 1. Библ. 1.

УДК 697.92

Охлаждение формовочного песка в вихревом потоке теплоносителя. Темкин Л.И., Несенчук А.П. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 40-42.

Рассматривается вопрос о возможности охлаждения формовочного песка в вихревом потоке теплоносителя. Приводятся практические рекомендации о возможности внедрения данного способа охлаждения в производство серого и ковкого чугуна. - Ил. 1. Библ. 1.

УДК 541.183.12

Определение изостерической теплоты адсорбции синтетических цеолитов. Сомова С.В., Несенчук А.П. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 43-45.

На основании экспериментальных данных получены изотермы адсорбции  $\text{CO}_2$  для ряда синтетических цеолитов. Также расчетным путем определены изостерические теплоты адсорбции  $\text{CO}_2$  этими материалами. - Ил. 3. Табл. 1. Библ. 2.

УДК 621.311.1:537.312.62

Об учете распределенности параметров криогенных линий в электрических расчетах. Поспелов Г.Е., Федия В.Т. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 46-49.

Получен вывод о том, что для пофазно-коаксиальных конструкций криогенных линий погрешности расчета параметров схем замещения по различным формулам не зависят от номинального напряжения, расчетной мощности линии и материала сверхпроводника. Определены области использования приближенных формул при расчете параметров схем замещения криогенных линий. - Ил. 1. Библ. 2.

УДК 621.316

Учет потерь на корону при планировании режимов работы электрических сетей 110 - 750 кВ по напряжению и реактивной мощности. Прокопенко В.Г. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 49-52.

Разработана методика учета потерь мощности на корону при планировании режимов работы замкнутых сетей 110 – 750 кВ по напряжению и реактивной мощности. Описана программная реализация методики и некоторые результаты практических расчетов. – Табл. 1. Библ. 3.

УДК 621.315

Об учете коронирования проводов при оптимизации установившихся режимов линии электропередачи. Поспелов Е.Г. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 52–54.

При оптимизации режимов линий электропередач высокого напряжения должны учитываться потери на корону. При этом активная проводимость должна определяться по потерям, соответствующим моменту и погодным условиям оптимизации. Наибольшие возможности для такого учета имеются при наличии АСУ энергосистемами. В статье намечена методика учета указанных потерь при оптимизации установившихся режимов линий электропередачи. – Библ. 2.

УДК 621.315.1

Методика расчета токов, стекающих с автомобилей на землю, в зоне влияния воздушных линий сверхвысокого напряжения. Иванова С.Н., Гончарик Е.П. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 54–57.

Изложена упрощенная методика расчета токов замыкания корпуса автомобилей на землю, работающих в электрическом поле воздушных линий сверхвысокого напряжения. – Ил. 2. Библ. 1.

УДК 621.311.1

О принципах выбора оптимальной структуры генерирующих мощностей в энергетической системе. Падалко Л.П., Нагорнов В.Н. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 57–61.

Излагается методика выбора оптимального соотношения между базовыми и маневренными генерирующими источниками в энергосистеме. Отмечается, что решение задачи с точки зрения экономики обеспечивает одновременно учет ограничений технического характера. – Библ. 4.

УДК 621.311.16.014

Расчет коррекции установившегося режима энергосистемы. Петров В.В., Белоусова Р.И. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 61–65.

Предлагается алгоритм оперативного ввода контролируемых параметров в область заданных ограничений, позволяющий на каждом шаге итерации получить приближение к оптимальному решению по всем параметрам. – Ил. 1. Библ. 3.

УДК 621.3.016.351

Особенности протекания переходных процессов в системе собственных нужд электростанций в аварийных условиях. Калентионок Е.В., Файбисович В.А. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 66–68.

Для делительной автоматики станции наряду со снижением частоты необходимо учитывать факторы, характеризующие возникновение "лавины напряжения" на собственных нуждах. В качестве таких факторов могут быть использованы одновременное снижение напряжения и непрерывное уменьшение активной мощности собственных нужд в течение  $0,5 \div 1$  с. – Ил. 1. Библ. 1.

УДК 621.315.1

Основная концепция автоматизированной системы проектирования (АСП) с учетом существующей технологии проектирования электросетевых объектов. Фальковский О.В. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 68–71.

Рассмотрена существующая технология проектирования электросетевых объектов и установлена необходимость выработки такой методологии в условиях АСП, которая предусматривала бы высокую эффективность принимаемых решений и возможность управления технологи-



ческим процессом проектирования. - Ил. 1.

УДК 621.311:681.325

Некоторые положения по построению информационного обеспечения АСУ энергосистемами. Поспелова Т.Г., Запатрин Р.И. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 71-73.

Определяются структура и некоторые задачи организации информационного обеспечения АСУ энергосистемами. Предлагаются два способа их решения: представление информации в памяти ЭВМ в виде  $n$ -мерных массивов и придание трансляторам особых свойств.

УДК 621.311.019.9

Алгоритм ввода и корректировки массивов нормативно-справочной информации на МД по электросетевому оборудованию. Урбанович В.С. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 73-76.

Предлагается алгоритм ввода и корректировки рабочих массивов информации на МД. Приведена блок-схема алгоритм, на основании которого разработана программа (язык ФОРТРАН 1V) для корректировки массивов НСИ в условиях функционирования АСУ энергосистемы. - Ил. 1.

УДК 621.313.32:538.311

Геометрия лобовой дуги обмотки статора турбогенератора с учетом размеров поперечного сечения стержня обмотки. Губанович А.Г. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 77-80.

Приведен способ аналитического описания геометрии лобовой дуги обмотки статора турбогенератора с учетом размеров поперечного сечения стержня обмотки. Способ реализуется на ЭЦВМ. - Ил. 1. Библ. 1.

УДК 621.316.925

Методика выбора уставок дифференциальных защит понижающих двухобмоточных трансформаторов на ЦВМ. Глинский Е.В., Тишечкин А.А. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 80-83.

Рассмотрены алгоритм и программа расчета токов короткого замыкания и выбора уставок дифзащит понижающих двухобмоточных трансформаторов. Расчет токов короткого замыкания производится с учетом особенностей трансформаторов с РПН. Выбор уставок защит выполняется для любых схем соединения обмоток силового трансформатора. Программа позволяет рассчитывать дифзащиты с реле РНТ-565, РНТ-566/2, РНТ-566, ДЗТ-11, ДЗТ-11/3. - Ил. 1. Библ. 3.

УДК 621.316.925

Исследование работоспособности диффазной высокочастотной защиты с расположением информационных органов под рабочим потенциалом ЛЭП. Свита Л.Н. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 83-86.

На основании предложенной методики исследования диффазной высокочастотной защиты ЛЭП составлена программа расчета защиты, которая может найти практическое применение при исследовании быстродействия и чувствительности защиты на ЛЭП 750 кВ. - Ил. 2, Табл. 1. Библ. 3.

УДК 621.311.019.3

О прогнозировании надежности. Чаплина А.И. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 87-90.

Рассматриваются некоторые особенности задач надежности в энергетике. Описываются 2 конкретные модели отказов по износу электрооборудования и обсуждается их использование для прогнозирования надежности выключателей выше 1000 В, установленных на различных присоединениях. - Ил. 1. Библ. 3.

УДК 621.316

Оценка надежности работы оборудования трансформаторных подстанций 6 кВ. Травянский М.И. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 90-92.

На основе опыта эксплуатации трансформаторных подстанций 6 кВ одного города определены количественные показатели надежности работы силовых трансформаторов. - Библ. 1.

УДК 666.11.01.621.315

Исследование электропроводности многотитановых стекол. Ржевская С.П. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 92-94.

Исследована электропроводность стекол системы  $\text{BaO} - \text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$ . Установлена зависимость величины удельной проводимости от соотношения окислов бария и титана в стекле, что объяснено координационно-валентным состоянием иона титана. - Ил. 2. Библ. 3.

Математическая модель замкнутой системы тиристорного электропривода постоянного тока. Анхимюк В.Л., Новицкая В.А. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 95-98.

Рассматривается нелинейная динамическая модель вентильного электропривода постоянного тока, позволяющая в наиболее общей форме решать задачи динамики на базе представления переменных состояния в виде мгновенных значений фазовых координат. - Ил. 1.

УДК 62-83:621.313.13

Оптимизация структуры и параметров системы стабилизации частоты вращения с фазовым дискриминатором. Анхимюк В.Л., Слук М.П. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 98-101.

На основании метода динамического программирования предлагается методика оптимизации структуры и параметров системы стабилизации частоты вращения с фазовым управлением при использовании в качестве выявителя фазового рассогласования дискриминатора с непериодической нормированной характеристикой, имеющей линейный рабочий участок. - Ил. 1. Библ. 2.

УДК 62-83:621.313.2.077:621.314.632

Приближенная методика построения статических характеристик вентильных приводов. Михеев Н.Н., Раткевич Е.П. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 102-105.

Предлагается для построения приближенных статических характеристик в прерывистом режиме вентильных приводов с преобразователями с нулевыми вентилями аппроксимировать участки синусоиды выпрямленного напряжения параболой и прямой линией и заменить показательные функции многочленами. - Ил. 2. Библ. 2.

УДК 62 - 523

О составлении передаточных функций по структурной схеме системы управления. Михеев Н.Н., Сацукевич В.Н., Раткевич Е.П. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 105-108.

Выводится формула, позволяющая получить выражение для передаточной функции сложной многоконтурной системы в виде, близком к окончательному, по структурной схеме и представляющая дальнейшее развитие формулы Мейсона. - Библ. 1.

УДК 621.313.333

Синтез эталонной модели для управления объектом автоматического регулирования с переменными параметрами. Ильин О.П., Примшиц П.П. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 108-112.

Изложен метод синтеза эталонной модели, позволяющий определить параметры эталонной модели с учетом ограничений, имеющихся в системе автоматического регулирования. Методика синтеза поясняется конкретным примером. - Ил. 2. Библ. 1.

УДК 621.798

Формирование управляющего воздействия в системе управления электроприводом подачи в деревообработке. Ползак П.В., Максимов В.Я. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 112-117.

Рассматривается способ формирования управляющего воздействия в системе управления электроприводом подачи деревообрабатывающих станков проходного типа, учитывающий стохастичность процессов резания древесины. Представлена характеристика устройств реализующих данный фильтр и метод его расчета. - Ил. 2. Библ. 4.

УДК 62-83:621.313.323:66

Тиристорный электропривод прядильных машин. Парфенович О.Н., Слука М.П. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 117-119.

Рассматривается система электропривода к импортному прядильно-формовочному агрегату производства полиэфирных кордных нитей, определена требуемая точность стабилизации скорости электроприводов прядильной машины. - Ил. 1. Библ. 3.

УДК 621.313.333

Допустимый момент асинхронного двигателя при квазичастотном управлении. Фираго Б.И., Сидоров В.Г. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 119-123.

Рассматривается инженерная методика расчета допустимого момента АД при питании от однополупериодного циклоконвертора, основанная на аппроксимации зависимости потерь от высших гармоник напряжения полиномом второй степени от потока в двигателе. Закон частотного регулирования принят  $\Phi = \text{const}$ . - Ил. 1. Библ. 4.

УДК 621.313.3

О тепловом режиме асинхронных двигателей при повышении расчетной частоты. Гончар А.А. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 123-124.

Применение частот выше 50 Гц приводит к уменьшению размеров асинхронных двигателей, что вызывает увеличение перегрева обмоток статора. Показано изменение теплового режима асинхронных двигателей при повышении расчетной частоты от 50 до 200 Гц. - Библ. 2.

УДК 621.314.58

Быстродействующая защита тиристорного преобразователя. Черномашенцев В.Г., Пацкевич В.А., Уржумсков А.М., Зинин Ю.М. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 125-128.

Рассматривается быстродействующая система конденсаторной защиты с диодным короткозамыкателем, позволяющая уменьшить в аварийном режиме энергию, поступающую из сети в инвертор.

Анализируется работа схемы разработанной быстродействующей защиты при отключении аварийных токов.

Приводятся графики для выбора конкретных параметров элементов защиты. - Ил. 2. Библ. 2.

УДК 62-83:621.313.3-592.3

Индукционно-динамическое торможение двухскоростных асинхронных двигателей. Лапинус А.И. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 128-131.

Рассматривается схема индукционно-динамического торможения двухскоростных асинхронных короткозамкнутых двигателей, тормозной эффект в которой достигается действием составляющих момента короткого замыкания обмоток статора через вентиль и динамического торможения. Схема может быть рекомендована для точной остановки электроприводов металлорежущих станков и других производственных механизмов. - Ил. 2. Библ. 3.

УДК 621.365

Применение полупроводниковых пленочных электронагревателей для низкотемпературных технологических процессов. Герасимович Л.С., Яновский Л.П. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 131-135.

Рассмотрены принцип устройства, технические характеристики и особенности конструкции установок с пленочными электронагревателями для подогрева электролитов при гальваническом золочении, моющих растворов и сушки часовых деталей, испытанные и внедренные на Минском часовом заводе. - Ил. 1. Табл. 1. Библ. 1.

УДК 621.314.263

Расчет амплитудных характеристик феррорезонансного формирователя импульсов. Можар В.И. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 135-138.

Произведен расчет амплитуды импульса тока от амплитуды входного напряжения феррорезонансного формирователя импульсов. - Ил. 1. Библ. 3.

УДК 621.314.26

Алгоритм расчета внешних характеристик трансформатора-преобразователя частоты. Сончик Л.И. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1978, вып. 5, с. 139-142.

Предложен алгоритм расчета внешних характеристик трансформатора-преобразователя частоты на базе витого пространственного магнитопровода с учетом потерь на вихревые токи. - Ил. 2. Библ. 1.