

Министерство высшего и среднего специального образования БССР

Белорусский ордена Трудового Красного Знамени
политехнический институт

РЕСПУБЛИКАНСКИЕ МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЕ СБОРНИКИ

НАУЧНЫЕ
И
ПРИКЛАДНЫЕ
ПРОБЛЕМЫ
ЭНЕРГЕТИКИ

Выпуск 6

Минск "Вышэйшая школа" 1979

Главный редактор
кандидат технических наук Ю.А.Малевич

Редакционный совет:

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

И.П.Шпорта, В.И.Трутаев,
А.М.Леонков, канд.техн.наук,
Б.В.Яковлев, канд.техн.наук

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

На XXV съезде КПСС и декабрьском (1977) Пленуме ЦК КПСС проблемы топливно-энергетического комплекса были названы в числе важнейших народнохозяйственных задач на современном этапе. В какой-то мере эти проблемы связаны с интенсивным ростом потребления энергоресурсов, частично порождены процессами, происходящими в самом топливно-энергетическом комплексе. В определенной степени на них оказали влияние и известные осложнения в мировом энергетическом хозяйстве. В целом же они создали определенные трудности в обеспечении народного хозяйства топливом и энергией, которые должны понимать и учитывать в своей деятельности все инженерно-технические, научные и хозяйственные работники.

Из множества проблем топливно-энергетического комплекса - электроэнергетических, теплотехнических, ресурсных, экологических - мы остановимся лишь на проблемах топливно-энергетического баланса и системах топливоснабжения как наиболее острых для всех отраслей народного хозяйства.

Согласно статистическим данным в 1975 г. в нашей стране было израсходовано 1673,8 млн. т условного топлива. Около 34% этого топлива пошло на выработку электрической и тепловой энергии, 52% - на различные производственно-технические процессы. Из всего потребленного котельно-печного топлива 43,8% приходилось на нефть, 20,8 - на природный газ, 32,1 - на уголь и 3,3% - на прочие виды топлива, в основном торф, дрова, сланцы. Из всего топлива, потребленного на энергетические цели (производство тепла и электроэнергии), 440 млн. т (77,5%) было израсходовано на тепловых электростанциях. В 1975 г. в Минэнерго СССР на органическом топливе работало 783 электростанции общей установленной мощностью 148,6 млн. кВт, на которых было выработано 819,8 млрд. кВт.ч электроэнергии и 682,2 млн. Гкал тепла.

Благодаря техническому прогрессу и организационным мероприятиям, направленным на экономию топливных ресурсов, темпы роста потребления топлива в стране за последние десятилетия заметно снижались. На основании выполненных прогнозов предполагается, что абсолютный прирост потребления топлива в народном хозяйстве стабилизируется. Относительные же темпы роста потребления топлива будут неуклонно снижаться.

В целом на Советский Союз приходится около 20% мирового потребления энергоресурсов. Но учитывая, что на территории нашей страны сосредоточено более половины мировых запасов угля, поэтому нет каких-либо оснований говорить о недостатке топливных ресурсов, что характерно для многих развитых стран и мира в целом. Имеющиеся на данном этапе трудности в обеспечении народного хозяйства топливом в значительной мере связаны с перестройкой топливного баланса, отставанием и непропорциональным развитием новых топливных баз и дальних топливно-транспортных связей.

Чтобы глубже понять суть происходящих изменений в топливном балансе, проанализируем кратко основные движущие факторы эволюции топливного баланса на длительном отрезке времени и на этой основе оценим складывающуюся новую стратегию в использовании различных видов топлива. В развитии топливного баланса нашей страны, как и балансов других развитых стран и мира в целом, на протяжении длительного периода четко прослеживаются три качественно различных этапа: а) преимущественного использования древесного топлива, б) интенсивного увеличения доли ископаемых твердых топлив (угля, торфа, сланцев), в) интенсивного увеличения доли высококачественного жидкого и газообразного топлива. Разница состоит лишь в том, что в Советском Союзе названные этапы протекали позднее и в более сжатые сроки, в чем сказались преимущества плановой социалистической системы хозяйства.

Из многообразия влияющих факторов – ресурсных, технических, экономических, экологических, политических, социальных – определяющее влияние на изменение структуры топливного баланса на протяжении всего прошлого периода оказывали лишь технические и экономические факторы. Остальные факторы имели второстепенное значение. Только этим можно объяснить тот факт, что сложившаяся к настоящему времени структура потребления топливных ресурсов находится в крайнем несоответствии со структурой запасов. Так, интенсивный

рост потребления угля в 30-е и 40-е годы был вызван отнюдь не ресурсными соображениями (хотя и тогда уже было ясно, что угли занимают основную долю в запасах топливных ресурсов), а состоянием развития техники добычи и транспорта в тот период и наличием достаточных трудовых ресурсов в стране. То же можно сказать и о начавшемся в середине 50-х годов интенсивном росте потребления нефти и газа, который стал возможен благодаря успешному развитию добычи и трубопроводного транспорта и позволил получить значительный экономический эффект.

Анализируя продолжавшийся в течение двух десятилетий процесс увеличения доли нефти и газа в топливном балансе, мы усматриваем в нем не только экономическое, но и большое политическое значение. Он позволил свести к минимуму неблагоприятные для нашей страны различия в структуре топливного баланса по сравнению с развитыми капиталистическими странами и в первую очередь с США, создав тем самым равные условия в экономическом соревновании двух мировых систем в области энергоснабжения. Вместе с тем очевидно, что в условиях несравненно меньшей обеспеченности жидким и газообразным топливом по сравнению с углем этот процесс не может продолжаться бесконечно долго. Объективно рост доли нефти и газа в расходной части топливного баланса должен быть приостановлен в такой момент, когда внешние и внутренние условия развития топливно-энергетического комплекса страны создадут благоприятную возможность для приведения в соответствие структуры потребления топливных ресурсов структуре запасов.

Сложившаяся международная конъюнктура на нефть и газ и хорошие предпосылки для развития мощных и высокоэкономичных угольных месторождений на востоке страны в настоящее время создали такую возможность. Это послужило исходным моментом для принятия на XXV съезде КПСС новой стратегии в развитии топливно-энергетического баланса, направленной на всемерное сокращение расходов жидкого топлива в энергетике и расширение использования твердых топлив. Исходя из этого, Госплан СССР разработал динамику изменения структуры топливно-энергетического баланса на предстоящее пятнадцатилетие. Учитывая успехи геологических изысканий природного газа в девятой пятилетке, Госплан СССР счел возможным при разработке перспективной структуры топливно-энергетического баланса сохранить в ней некоторый рост доли газа. Однако

реализация намеченной программы топливоснабжения потребовала достаточно высоких трудовых и денежных затрат и в отдельных вопросах столкнулась с достаточно большими техническими трудностями. Чтобы глубже понять сложившуюся ситуацию, кратко рассмотрим положение по каждому топливному ресурсу.

Нефть. С возникновением так называемого энергетического кризиса мировые цены на нефть возросли более чем в пять раз. В настоящее время мировые цены на нефть устанавливаются по легкой Аравийской нефти, и, согласно данным последней конференции стран ОПЭК (международная организация 13 стран – производителей нефти), в настоящее время составляют 12,7 долларов за баррель (159 л.) или 94 доллара за тонну. В этих условиях возникла экономически благоприятная ситуация для продажи нефти на мировом рынке. Советский Союз продает значительное количество нефти и нефтепродуктов. Вместе с тем в развитии отечественной нефтедобывающей промышленности за последние годы выявился ряд объективных трудностей – не полностью подтвердились определенные ранее на стадии геологопоисковых работ уровни промышленных запасов на ряде нефтяных месторождений. В результате стоимость добычи нефти в стране стала расти. Возник также ряд трудностей с сооружением дальних нефтепроводов. Эти обстоятельства привели к тому, что намеченный ранее предельный уровень добычи нефти в стране на перспективу был снижен. Кроме того, возникла необходимость более глубокой переработки нефти с большим выходом светлых нефтепродуктов для интенсивно растущего автомобильного парка.

Природный газ. Обеспеченность природным газом выше, чем нефтью. Основным центром добычи природного газа в стране является Западная Сибирь. Несмотря на единичные мощности сибирских газовых месторождений, обуславливающие их высокую экономичность, добыча и особенно транспортировка газа в этих условиях фактически обходится значительно дороже, чем на менее мощных газовых месторождениях европейской части страны и даже по сравнению с теми затратами, которые предполагались при проектировании этих месторождений. Последнее хорошо просматривается на примере Белорусской ССР. Если 5 – 8 лет назад суммарные приведенные затраты на добычу и транспорт северотюменского природного газа до границ республики оценивались по данным проектов в размере 9–10 руб./ту.т., то в выполненной в 1977 г. схеме газифика-

ции республики, с учетом уже фактических данных, эти затраты были приняты в размере 20 руб./т.т. Указанное двукратное удорожание добычи и транспорта газа при относительном снижении затрат на добычу угля привело в последние годы к резкому снижению сравнительной экономической эффективности газа как топлива. Проведенные исследования показали, что повышенные капитальные вложения в добычу северокуменского газа по сравнению с углем в настоящее время окупаются лишь через 5–8 лет эксплуатации газовых месторождений. В этих условиях по-новому ставится вопрос об экономическом формировании структуры топливно-энергетического баланса на перспективу.

В отличие от нефти природный газ, вследствие ограниченной дальности транспортировки, не является ресурсом для широкой международной торговли топливом и в основном расходуется внутри страны. При наличии отмеченных выше экономических ограничений в добыче газа и определенных технических трудностей в его транспортировке на дальние расстояния топливно-энергетический баланс по газу на ближайшую перспективу ограниченно открыт или, как говорят, полуоткрыт. В имеющихся прогнозах по развитию газификации предполагается некоторое увеличение доли газа в топливно-энергетическом балансе. В первую очередь газ будет направляться на коммунально-бытовые и промышленно-технологические топливоиспользующие установки, частично он будет замещать мазут в энергоустановках, расположенных в городах.

Уголь. Колоссальные запасы угля сосредоточены в восточных районах страны, главным образом в Канско-Ачинском, Южно-Якутском, Кузнецком и Экибастузском угольных и бурогольных бассейнах. Добыча угля на этих месторождениях осуществляется в основном открытым способом, с применением новейшей техники и обходится дешево. С развитием бассейнов повышается эффективность всей угольной промышленности в целом. Предполагается, что за предстоящее пятнадцатилетие стоимость добычи угля в стране снизится. Однако в ближайший период, до освоения проектной мощности названных бассейнов, потребность в угле в значительной степени будет удовлетворяться за счет старых угольных баз европейской части страны, вступивших в период падающей добычи и малоэкономичных.

Одна из характерных особенностей угольной промышленности состоит в том, что она требует значительных капиталовложений на поддержание заданного уровня добычи. В течение

предыдущего десятилетия, когда основной крен делался в сторону увеличения доли нефти и газа в топливном балансе, необходимых средств на поддержание уровня добычи угля отпускалось недостаточно. В результате сложилось такое положение, что из каждой единицы введенной в настоящее время угледобывающей мощности $4/5$ ее идет на компенсацию выбывающей мощности, вследствие чего темпы роста мощности в угольной промышленности существенно замедлились.

Такое положение является временным и выход из него видится в форсировании разработки и использования углей вышеназванных восточных месторождений. Одним из узких мест на пути широкого использования восточных углей в европейских районах является транспорт. Пропускная способность существующих железнодорожных связей с восточными районами недостаточна для перевозки необходимого количества угля. В этих условиях большое значение приобретает выбор правильных пропорций в развитии железнодорожного и специализированного транспорта – трубопроводного и линий электропередач. Учитывая, что подавляющая доля углей восточных месторождений содержит много балласта (золы и влаги), большое внимание уделяется их энерготехнологической переработке, обогащению и использованию на месте с целью получения электроэнергии. В этом отношении серьезного внимания заслуживают ведущиеся в настоящее время научные и проектные разработки по комплексному использованию наиболее крупного бурого угольного бассейна страны – Канско-Ачинского, известные как проблема КАТЭК (Канско-Ачинский топливно-энергетический комплекс). В зависимости от того, насколько качественные решения будут приняты по КАТЭК и как успешно они будут реализовываться, во многом зависит структура топливного баланса страны на ближайший период.

Существенную роль в смягчении напряженности топливно-энергетического баланса европейских районов страны на перспективу призвана сыграть атомная энергетика. При выборе путей развития атомной энергетике все больше на первый план выступает критерий максимального замещения расхода органического топлива ядерным горючим. Как показали исследования, применение атомной энергии только для производства электроэнергии не решает указанной задачи. В этих условиях возникает объективная необходимость использования атомной энергии в системах централизованного теплоснабжения и, в частности, в теплофикации. Сейчас ни одна схема теплоснабжения любого крупного города на перспективу не рассматривается ут-

верждающими инстанциями без атомного варианта. Сокращение расхода органического топлива в этих вариантах достигается посредством прямой замены источников теплоснабжения на органическом топливе атомными, путем перевода этих источников в пиковый режим, а также за счет подключения к тепломагистралям, идущим от атомных теплоисточников попутных потребителей, расположенных по трассе теплопроводов.

Исследования показывают, что при использовании ядерного горючего в теплофикации замещается в 1,6 раза больше органического топлива по сравнению с отдельной схемой. Однако предлагаемые атомные ТЭЦ большой единичной тепловой мощности требуют высококонцентрированных тепловых нагрузок, доля которых в тепловом балансе на перспективу сравнительно невелика. При меньшей единичной мощности атомные ТЭЦ экономически не оправданы. Поэтому в целях максимального сокращения расхода органического топлива для развития систем централизованного теплоснабжения с атомными источниками необходимы относительно дешевые компактные и высокоманевренные атомные котельные малой и средней мощности, которые могут быть использованы для теплоснабжения небольших городов, промышленных узлов и поселков городского типа. Разработка таких котельных в настоящее время ведется в ряде специализированных организаций.

Важнейшим направлением снижения напряженности топливного баланса продолжает оставаться экономия энергоресурсов. Установленные задания по снижению норм расхода всех видов энергоресурсов на десятую пятилетку предусматривают экономию в общей сложности более 450 млн. т условного топлива, а это означает, что ежегодная экономия энергоресурсов к концу пятилетия составит 150 млн. т. Более 45% всей экономии намечается получить в большой энергетике за счет повышения к.п.д. энергоустановок и сокращения потерь при транспортировке энергии, остальную часть — в промышленности, строительстве, на транспорте, в сельском хозяйстве и в жилищно-коммунальном секторе. Для выполнения этих заданий необходимо в полной мере осуществлять предусмотренные для этой цели организационные и технические мероприятия, мобилизовав усилия и творческую активность всего народа.

Со значительными успехами в развитии топливно-энергетического хозяйства пришла Белорусская ССР к своему шестидесятилетию. В республике достигнут высокий уровень централизации энергоснабжения — по электроэнергии 99% и тепло-

энергии 52%. Удельные расходы топлива на производство энергии ниже, чем в среднем по стране. В топливном балансе более 75% занимают наиболее эффективные виды топлива — мазут и природный газ. В настоящее время в республике эксплуатируется 23 электростанции, входящие в Белорусскую энергосистему, 106 районных и 2675 промышленных котельных. Общая протяженность электрических сетей составляет около 200 тыс. км и тепловых сетей более 1000 км.

Основные проблемы развития топливно-энергетического комплекса Белорусской ССР на ближайшую и отдаленную перспективу тесно связаны с процессами, происходящими в энергетическом хозяйстве страны, но во многом определяются местными и республиканскими факторами.

В области электроэнергетики важным вопросом является покрытие растущей электрической нагрузки. В республике в течение длительного времени поддерживалось условие, близкое к электроэнергетическому самобалансу, при котором электрические нагрузки покрывались в основном от собственных топливных электростанций. При достаточной обеспеченности местными и привозными топливными ресурсами в условиях объединенной энергосистемы Северо-Запада такое положение обуславливалось экономическими соображениями и в какой-то мере было оправдано. В настоящее время, при наличии острого дефицита и возрастающей стоимости органического топлива и размещении в районах прилегающих к БССР крупных атомных электростанций, ситуация коренным образом меняется. Приходится решать вопрос, развивать ли дальше топливные ТЭС (но уже на дальнепривозном твердом топливе), строить в БССР атомные электростанции или же получать необходимую республике электроэнергию от соседних энергосистем. Значительная трудность создается также при обосновании дальнейшего развития теплофикации, так как при высоких замыкающих затратах на органическое топливо и при сравнительно дешевой электроэнергии на АЭС топливные теплоэлектроцентрали при обычных для них режимах работы в энергосистеме экономически не оправдываются и возникает необходимость для повышения эффективности ТЭС привлекать их к покрытию пика электрических нагрузок и к решению острых экологических проблем, связанных с загрязнением окружающей атмосферы.

Особо важной проблемой является предстоящая перестройка структуры топливного баланса республики в направлении резкого снижения доли мазута в соответствии с топливной поли-

тикой, принятой на XXV съезде партии. В настоящее время доля мазута в общем потреблении топлива в БССР составляет около 53% и должна быть сокращена за счет роста потребления угля и природного газа. В разработанной и утвержденной Министерством газовой промышленности СССР перспективной схеме газоснабжения республики предусматривается четырехкратное увеличение потребления природного газа. При полной реализации принятых в схеме решений будет создана возможность высвободить значительное количество дорогого и дефицитного нефтяного топлива и наиболее эффективно решить проблемы загрязнения воздушного бассейна белорусских городов.

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.25

А.Д. Качан, канд. техн. наук, доцент,
А.М. Леонков, канд. техн. наук, профессор,
В.М. Сыропушинский,
Б.В. Яковлев, канд. техн. наук

МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБИН ТИПА ТК ДЛЯ АТЭЦ

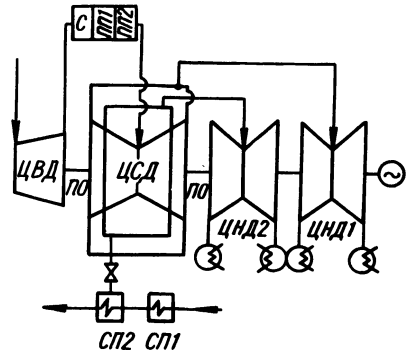
С учетом целесообразности поддержания номинальной нагрузки реактора в течение всего года для АТЭЦ наиболее предпочтительными являются турбины теплофикационно-конденсационные типа ТК с большой привязанной конденсационной мощностью [1,2]. Турбины ТК предполагается выполнять без регулирующих органов перед цилиндрами низкого давления (ЦНД). Это позволит исключить дросселирование конденсационных пропусков пара, что особенно важно для АТЭЦ ввиду низких начальных параметров пара и значительной доли мощности ЦНД.

Эффективность турбин с нерегулируемыми отборами пара для подогрева сетевой воды при работе на разных режимах будет определяться расчетными сопротивлениями ЦНД и промежуточного отсека (ПО). Расчетное сопротивление этих отсеков определяет график подогрева сетевой воды, величину отпуска тепла от турбины, экономичность теплофикационной выработки электроэнергии, достигаемую величину коэффициента теплофикации, и в целом расчетные затраты на АТЭЦ. Поэтому выбор расчетных характеристик турбин ТК (выбор сопротивления ЦНД турбины, которое при данном давлении в конденсаторе характеризуется зависимостью начального давления от расхода пара в конденсатор, и выбор расчетного теплоперепада на отсек, при котором обеспечивается минимум потерь в ступенях этого отсека на нерасчетных режимах) должен основываться на подборе сопротивлений ЦНД и ПО из условия минимума расчетных затрат

$$Z = Z_{\text{зам}}^T b_Q^{\text{ПВК}} Q_{\text{пик}}^{\text{год}} + (p_n + p_{\text{э}}) (K_{\text{уд}}^{\text{ПВК}} Q_{\text{пик}}^{\text{ч}} + K_{\text{уд}}^{\text{Т.С}} Q_{\text{турб}}^{\text{ч}} + Z_{\text{зам}}^{\text{ЭЭ}} \Delta \text{Э} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где капитальные вложения в АТЭЦ приняты постоянными; $Z^1_{зам}$ - замыкающие затраты на органическое топливо, руб./ту.т; $b_{ПВК}$ - расход топлива на один отпущенный ГДж от пиковой котельной, ГДж; $K_{ПВК}^{уд}$ - удельные капиталовложения в пиковую котельную, руб./ГДж; $Q_{ч}^{уд}$ - часовой отпуск тепла от пиковой котельной, ГДж; $K_{Т.С}^{уд}$ - удельные капиталовложения в тепловые сети, руб./ГДж; $Q_{ч}^{уд}$ - максимальный часовой отпуск тепла от турбины, ГДж; $Z^2_{зам}$ - замыкающие затраты в электроэнергию, руб./МВт.ч; $\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_{год}^{max} - \mathcal{E}_{год}$ - разность между годовой выработкой электроэнергии при работе АТЭЦ в конденсационном режиме и действительной величиной ее, МВт.ч.

Рис. 1. Схема турбоустановки типа ТК: ЦВД – цилиндр высокого давления; ЦСД – цилиндр среднего давления; СП1 и СП2 – соответственно нижний и верхний сетевой подогреватель; С – сепаратор; ПП1 и ПП2 – промежуточные пароперегреватели первой и второй степени соответственно.



За основу принята схема турбоустановки ТК, предложенная УТМЗ (рис. 1). Расчет ведется в следующей последовательности. Задаваясь различными сочетаниями сопротивлений ЦНД1, ЦНД2, ПО для заданного температурного графика теплосети и заданного максимального отпуска тепла от АТЭЦ, определяем давление в отопительных приборах турбины, действительный график подогрева сетевой воды в сетевых подогревателях, конденсационную и теплофикационную выработку электроэнергии, годовой отпуск тепла от ПВК и их мощность (значение α ТЭЦ).

Сопротивление отсеков характеризуется значениями:

$$k_1 = \frac{G_{исх}^{ЦНД1}}{P_{от1}} ; \quad (2)$$

$$k_2 = \frac{G_{исх}^{ЦНД2}}{P_{от2}} ; \quad (3)$$

$$k_{\text{по}} = \frac{(p_{\text{от } 2}^{\text{исх}})^2 - (p_{\text{от } 1}^{\text{исх}})^2}{(G_{\text{по}}^{\text{исх}})^2} \quad (4)$$

в некотором исходном режиме работы турбины.

Расчет режима работы сетевых подогревателей ведется для различных температур наружного воздуха с дискретным изменением их значений в следующей последовательности.

Задается величина $p_{\text{от } 1}^{\text{исх}}$, после чего определяются расход пара в ЦНД 1 $G_{\text{ЦНД } 1}$, k_1 , $p_{\text{от } 1}$, температура сетевой воды за первым подогревателем, расход пара на первый подогреватель $G_{\text{от } 1}$, а также расход пара через ПО. По давлению в отборе и расходу через ПО определяется давление в верхнем отборе

$$p_{\text{от } 2} = \sqrt{G_{\text{по}}^2 k_{\text{по}} + p_{\text{от } 1}^2} \quad (5)$$

расход через ЦНД 2 и температура сетевой воды за верхним подогревателем.

По уравнению теплового баланса находится расход пара на верхний подогреватель и проверяется баланс пара

$$G_{\text{от } 2} = G_{\text{о}} - \sum G_{\text{рег}} - G_{\text{ЦНД } 2} - G_{\text{по}} \quad (6)$$

Расчет повторяется до тех пор, пока не будет соблюдено равенство (6).

По результатам расчетов определяется годовой отпуск тепла из отборов и от ПВК, суммарная выработка электроэнергии и суммарные расчетные затраты для каждого варианта.

Очевидно, что для каждой величины отпуска тепла от ТЭЦ будут свои оптимальные сочетания сопротивлений ЦНД и ПО. Однако достаточно установить несколько типоразмеров для заданного диапазона изменения Q^{max} .

Если турбина ТК имеет несколько ЦНД, то с целью обеспечения большего отпуска тепла от турбины целесообразно предусмотреть установку на перепускных трубах ЦНД запорных органов (затворов).

Данная методика предусматривает наличие таких органов при расчете подогрева сетевой воды.

При этом для любых значений $p_{\text{от } 1}$ расход пара в ЦНД 1 (работа с закрытыми запорными органами) должен приниматься минимально вентиляционным $G_{\text{цнд}}^{\text{min}}$.

Равным образом данную методику можно применять для оптимизации характеристик турбин типа Т с регулирующими органами перед ЦНД. В этом случае расход пара в ЦНД будет приниматься изменяющимся в пределах от $G_{\text{ЦНД}}^{\min}$ до $G_{\text{ЦНД}} = k_1 \cdot p_{\text{от } 1}$.

При расчете годовой выработки электроэнергии на АТЭС необходимо учитывать изменение к.п.д. ЦНД и ПО при переменном расходе пара. В первом приближении можно принять однозначную зависимость к.п.д. от относительного изменения величины [3]

$$\left(\sqrt{\frac{H_o^{\text{расч}}}{H_{oi}}} - 1 \right).$$

Расчету к.п.д. и мощности данного отсека должен предшествовать выбор его расчетного режима или величины $H_o^{\text{расч}}$, на которую проектируется проточная часть.

Расчетный теплоперепад на отсек определяется исходя из условия достижения минимальной дополнительной (против расчетного режима) величины потери, т.е. из условия

$$\Delta Q = \sum G_i \tau_i H_{oi} \Delta \eta = \min, \quad (7)$$

где G_i , H_{oi} , τ_i - соответственно расход пара через отсек, располагаемый теплоперепад на отсек в течение отдельных периодов работы турбины и продолжительность этих периодов.

Как показано в [3], условие (7) приводится к виду

$$H_o^{\text{расч}} = \left(\frac{\sum G_i \tau_i \sqrt{H_{oi}}}{\sum G_i \tau_i} \right)^2. \quad (8)$$

При заданном сопротивлении отсека определяются H_{oi} и к.п.д. отсека.

Величина $\dot{\mathcal{E}}_{\text{год}}^{\max}$ в уравнении (1), а значит, и расчетные характеристики турбины должны определяться с учетом заданного в течение суток режима работы турбины по расходу свежего пара.

Таким образом, предлагаемая методика позволяет комплексно оптимизировать характеристики турбин ТК и соотношение электрической и тепловой мощности ($\alpha_{ТЭЦ}$).

Л и т е р а т у р а

1. Мелентьев Л.А. Принципы атомной теплофикации. - Теплоэнергетика, 1976, № 11.
2. Смирнов И.А., Федяев А.В., Хрилев Л.С. Выбор профиля основного оборудования атомных ТЭЦ с турбинами типа ТК. - В сб.: Методы математического моделирования и оптимизации параметров, вида технологической схемы и профиля оборудования атомных конденсационных и теплофикационных электростанций. Иркутск, 1976.
3. Волков Н.П. и др. Исследование работы турбинных отсеков на переменных режимах. - Изв. вузов СССР. Энергетика, 1969, № 7.

УДК 621.311.22:628.1

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

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ТЭЦ С ЦЕНТРАЛЬНОЙ НАСОСНОЙ

Экономичность работы турбинных установок ТЭЦ существенно зависит от режима работы циркуляционной системы. При наличии центральной насосной в задачу оптимизации входит распределение охлаждающей воды между конденсаторами отдельных турбин с учетом их состояния, определение оптимального общего количества охлаждающей воды и выбор числа работающих циркуляционных насосов. Оптимизация режима циркуляционной системы должна осуществляться при полученных из условия оптимального распределения нагрузок или фактически заданных расходах пара в конденсаторы отдельных турбин ТЭЦ. При этом условием оптимального распределения охлаждающей воды между конденсаторами является достижение максимальной мощности, развиваемой в ЧНД турбин, с учетом затрат ее на привод циркуляционных насосов

$$\sum_{i=1}^n \Delta N_{\text{ЧНД}} - \sum_{j=1}^m \Delta N_{\text{ц.н}} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где n – число работающих турбоагрегатов; m – число дополнительно включенных или отключенных циркуляционных насосов; $\Delta N_{\text{ЧНД}}$; $\Delta N_{\text{ц.н}}$ – соответственно изменение мощности, развиваемой ЧНД турбин и затраченной на привод циркуляционных насосов, при изменении расхода охлаждающей воды.

Расчеты показывают, что приросты мощности ЧНД теплофикационных турбин по расходу охлаждающей воды $dN_{\text{ЧНД}} / dW$ во всех случаях являются падающими. Это означает, что условие (1) будет соблюдаться при

$$\left(\frac{dN_{\text{ЧНД}}}{dW} \right)_i = \left(\frac{dN_{\text{ц.н}}}{dW} \right)_k, \quad (2)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; k – число работающих циркуляционных насосов.

Мощность ЧНД теплофикационных турбин на переменных режимах при прямолинейном характере "универсальной" кривой поправок на вакуум описывается уравнением

$$\frac{N_{\text{ЧНД}}}{G_k} = a - b \frac{p_k}{G_k}, \quad (3)$$

где G_k – расход пара в конденсатор турбины; a , b – некоторые постоянные коэффициенты; p_k – абсолютное давление в конденсаторе.

Прирост мощности ЧНД турбин при изменении расхода охлаждающей воды

$$\frac{dN_{\text{ЧНД}}}{dW} = \frac{dN_{\text{ЧНД}}}{dp_k} \cdot \frac{dp_k}{dt_k} \cdot \frac{dt_k}{dW}. \quad (4)$$

Из (3) при заданном расходе пара в конденсатор получаем

$$\frac{dN_{\text{ЧНД}}}{dp_k} = -b. \quad (5)$$

Согласно [1] зависимость между температурой насыщения и давлением водяного пара для области давлений в конденсаторе меньше 0,1 МПа достаточно точно описывается эмпирической формулой

$$p_k = \left(\frac{t_k + 100}{57,66} \right)^{7,46} \cdot 10^{-5}. \quad (6)$$

Тогда

$$\frac{dp_k}{dt_k} = \frac{7,46 \cdot 10^{-5}}{57,66} \left(\frac{t_k + 100}{57,66} \right)^{6,46}. \quad (7)$$

Температура насыщения в конденсаторе определится как

$$t_k = t_{1В} + \delta t + \frac{q_k G_k}{C_p W}, \quad (8)$$

где $t_{1В}$ - температура воды на входе в конденсатор, $^{\circ}\text{C}$; δt - температурный напор в конденсаторе, $^{\circ}\text{C}$; q_k - тепло конденсации пара в конденсаторе, кДж/кг.

При этом для фиксированной величины $t_{1В} + \delta t$

$$\frac{dt_k}{dW} = - \frac{q_k G_k}{C_p W^2}. \quad (9)$$

Подставив выражения (5), (7), (8), (9) в (4), получаем

$$\frac{dN_{\text{ЧНД}}}{dW} = \frac{7,46}{57,66} \cdot 10^{-5} \frac{b q_k G_k}{W^2} \left(\frac{t_{1В} + \delta t + 100 + \frac{q_k G_k}{C_p W}}{57,66} \right)^{6,46} \quad (10)$$

Результаты расчетов $dN_{\text{ЧНД}}/dW$ для турбины ПТ-60-130/13 приведены на рис. 1. Здесь значение коэффициента b принято для турбины ПТ-60-130/13 по экспериментальным данным, равным $4,35 \cdot 10^5$, а тепло конденсации пара q_k в кДж/кг аппроксимировано выражением

$$q_k = 4,19 \left[500 + 664,4 (G_k \cdot 3,6)^{-0,64} \right].$$

На криволинейных участках универсальной кривой поправок на вакуум производные $dN_{\text{ЧНД}}/dP_k$ определялись графо-аналитическим методом.

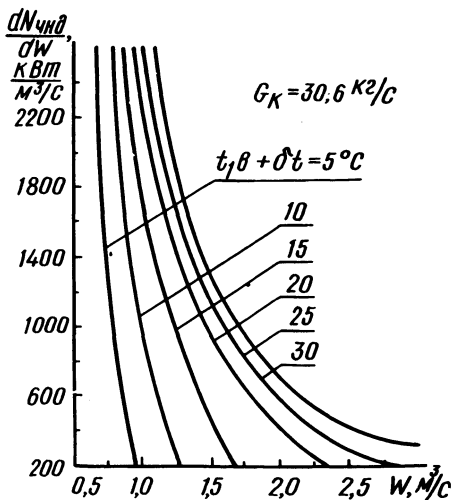


Рис. 1. Прирост мощности ЧНД турбин в зависимости от расхода охлаждающей воды для турбины ПТ-60-130/13.

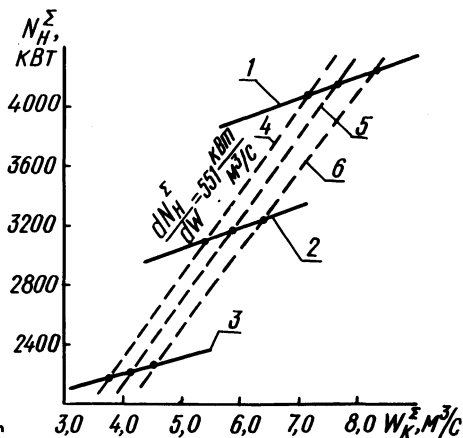


Рис. 2. Зависимость суммарной мощности, потребляемой циркуляционными насосами, и прироста их мощности от суммарного расхода охлаждающей воды через конденсаторы турбин и располагаемого напора циркуляционной воды на коллекторах ТЭЦ: 1, 2, 3 — число включенных циркуляционных насосов соответственно 4, 3, 2; 4, 5, 6 — сопротивление циркуляционной системы соответственно 10, 9 и 7, 5 м.

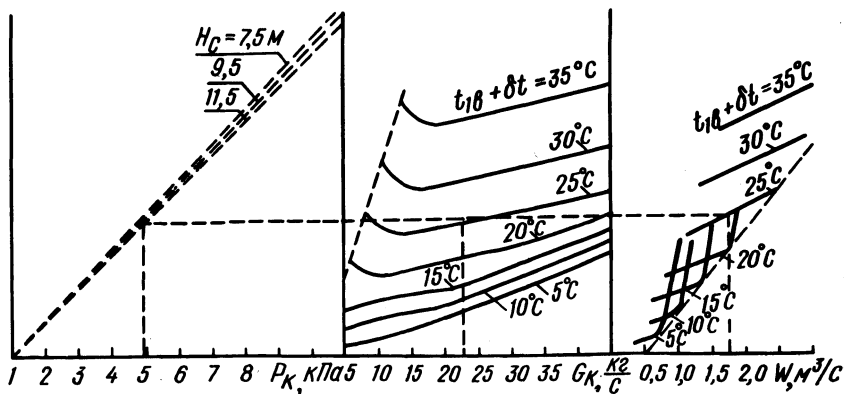


Рис. 3. Номограмма для определения оптимального числа работающих насосов применительно к турбине ПТ-60-130/13.

Приведенные на рис. 1 кривые прироста мощности ЧНД даны в зависимости от комплекса $t_{1В} + \delta t$ аналогично [2, 3]. Это позволяет при распределении охлаждающей воды учитывать реальную величину температурного напора в конденсаторе.

Как показали результаты испытаний циркуляционной системы Новополоцкой ТЭЦ, прирост мощности насосов (при дискретном увеличении числа работающих насосов) по расходу охлаждающей воды $dN_{\text{ЧНД}} / dW$ является для данной ТЭЦ практически постоянной величиной, зависящей от сопротивления циркуляционной системы параллельно включенных конденсаторов $N_c = f(\sum W_{ki})$, как это видно на рис. 2.

Наложив значения $dN_{\text{ЧНД}} / dW$ при заданном сопротивлении циркуляционной системы на полученные характеристики $dN_{\text{ЦН}} / dW$ при известных расходах пара в конденсаторы отдельных турбин, определяется оптимальный расход охлаждающей воды (оптимальный вакуум в конденсаторах), при кото-

$$\text{ром } \frac{dN_{\text{ЧНД}}}{dW} = \frac{dN_{\text{ЦН}}}{dW}.$$

Число включенных циркуляционных насосов должно быть выбрано таким, чтобы разность между суммарной производительностью их (рис. 2) и найденным оптимальным расходом воды по ТЭЦ была минимальной.

При найденном числе работающих насосов следует произвести перераспределение воды с целью достижения равного и минимального по значению прироста $dN_{\text{ЧНД}} / dW$ всех параллельно работающих турбин.

Номограмма определения оптимального числа работающих насосов для условий Новополоцкой ТЭЦ применительно к турбинам ПТ-60-130/13 приведена на рис. 3. Такие номограммы построены для турбоустановок ПТ-50-130/7 и ПТ-135/165-130/13 этой же ТЭЦ.

Л и т е р а т у р а

1. Рыжкин В.Д., Кузнецов А.М. Анализ тепловых схем мощных конденсационных блоков. М., 1972. 2. Орман Б.Э. Номограммный метод определения вакуума электростанций с центральной насосной. - Электрические станции, 1968, № 12. 3. Груев З. Определяне на оптимального количество охлаждаща вода за конденсаторите на парни турбини в ТЕЦ с правотоково централизирано водоснабдяване. - Енергетика (НРБ), 1975, 26, № 9.

ОТНОСИТЕЛЬНО УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ
РЕАЛЬНОГО ГАЗА

Как указывалось раньше [1], калорическое уравнение имеет вид

$$u = ap(v - b) + u(v) + u_*, \quad (1)$$

где b - минимальный объем, до которого может быть сжато рабочее тело при абсолютном нуле температуры.

Изохорная теплоемкость такого газа будет

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = a(v - b) \frac{\partial p}{\partial T}. \quad (2)$$

Учитывая, что $b = \text{const}$ и обозначая $v = v - b$, формула (2) примет следующий вид:

$$c_v = av \frac{\partial p}{\partial T}, \quad (3)$$

откуда

$$\frac{\partial c_v}{\partial v} = a \frac{\partial p}{\partial T} + av \frac{\partial^2 p}{\partial T \partial v}. \quad (4)$$

С учетом дифференциальных соотношений термодинамики получим

$$a \frac{\partial p}{\partial T} + av \frac{\partial^2 p}{\partial T \partial v} = T \frac{\partial^2 p}{\partial T^2}. \quad (5)$$

Для решения уравнения (5) воспользуемся методом разделения переменных $p = \varphi(T)\psi(v)$, тогда будем иметь:

$$a\varphi \frac{d\varphi}{dT} + av \frac{d\varphi}{dT} \frac{d\psi}{dv} = \varphi T \frac{d^2\psi}{dT^2} \quad (6)$$

или

$$\frac{a\psi + av \frac{d\psi}{dv}}{\psi} = \frac{T \frac{d^2\varphi}{dT^2}}{\frac{d\varphi}{dT}} = \varepsilon, \quad (7)$$

где ε - произвольная постоянная.

Решению подлежат два уравнения: первое для ψ

$$(a - \varepsilon)\psi + av \frac{d\psi}{dv} = 0, \quad (8)$$

откуда

$$\psi = c_1 v^{\frac{\varepsilon - a}{a}},$$

второе для φ

$$T \frac{d^2\varphi}{dT^2} - \varepsilon \frac{d\varphi}{dT} = 0. \quad (9)$$

Условие (9) выполняется в частном случае при $T=0$ и $\varphi = \text{const.}$ Это соответствует третьему закону термодинамики (при $T \rightarrow 0$ свойства вещества, в частности давление конденсированной фазы, перестают зависеть от температуры).

В общем случае имеем

$$\frac{d}{dT} T^\varepsilon \frac{d\varphi}{dT} = 0. \quad (10)$$

Дважды интегрируя, получаем

$$\varphi = \frac{c_2}{\varepsilon + 1} T^{\varepsilon + 1} + c_3. \quad (11)$$

Таким образом, частное решение исходного уравнения (5) будет

$$p_1 = \varphi T \psi_1 = \left(\frac{c_2}{\varepsilon + 1} T^{\varepsilon + 1} + c_3 \right) c_1 v^{\frac{\varepsilon - a}{a}}. \quad (12)$$

Установим возможные границы изменения ϵ . Решение (12) запишем

$$p = \frac{RT}{v} = \sum_{i=1}^n k_i T^{\epsilon_i} v^{\frac{\epsilon_i}{a}} + \sum_{i=1}^n B_i \frac{v}{v} \frac{\epsilon_i}{a}. \quad (13)$$

В сумме первого ряда один из членов должен быть равен единице, т.е. иметь степень $\epsilon = 0$. Кроме того, во всех членах ряда, содержащих температуру; выражение $v^{\frac{\epsilon_i}{a}}$ должно быть в знаменателе, т.е. $\frac{\epsilon_i}{a} < 0$, но $a = \frac{k}{k-1} > 0$ [1], поэтому $\epsilon \leq 0$. Если $\epsilon < -1$, то при $T \rightarrow 0$ первый ряд, содержащий температуру, должен дать бесконечно большое давление, которое в очень сильной степени будет зависеть от температуры, что противоречит третьему закону термодинамики.

Значит, при $T \rightarrow 0$ выражение $N = \frac{RT}{v} \left(1 + \sum_{i=1}^n k_i T^{\epsilon_i} v^{\frac{\epsilon_i}{a}} \right) \rightarrow 0$, которое может выполняться и только при $-1 < \epsilon_i \leq 0$. Единственным ограничением, накладываемым на второй ряд $f(v)$, является условие: при $v \rightarrow \infty$ имеет место $f(v) \rightarrow 0$, т.е. $\frac{\epsilon_i}{a} - 1 < 0$ или $\frac{\epsilon_i}{a} < 1$. Со стороны отрицательных значений для ϵ_i ограничений нет.

Таким образом, уравнение состояния принимает вид

$$p = \frac{RT}{v} \left[1 + \sum_{i=1}^n k_i \frac{1}{\left(T v^{\frac{1}{a}} \right)^{\epsilon_i}} \right] + f(v), \quad (14)$$

где $0 \leq \epsilon_i < 1$.

Целесообразно искать первый и второй члены уравнения (14) раздельно. Для этого вычислим $\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v$. Обозначая величину $\left(T v^{\frac{1}{a}} \right) = S$, можно записать

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v = \frac{R}{v} \left[1 + \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{S^{\epsilon_i}} (1 - \epsilon_i) \right]. \quad (15)$$

Таким образом, относительная упругость рабочего тела

$$\beta = \frac{v}{R} \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v = f(S)$$

зависит только от комплекса S . Для проверки данного вывода создана программа расчета $\beta = f(S)$ для воды и водяного пара в области параметров $p \leq p \leq 100 \text{ МПа}$, $T \leq T \leq 1073 \text{ К}$, исключая влажный пар, при различных величинах a, b . Расчеты производились по Международной системе уравнений для точного описания термодинамических свойств воды и водяного пара [2] и контролировались по данным [2, 3]. Во всем указанном диапазоне, кроме надкритической области и района аномалии плотности, однозначная зависимость относительной упругости от значения комплекса $S = T v^{\frac{1}{a}}$ выполняется с погрешностью не более 1%. Этот факт позволяет надеяться на получение достаточно простого уравнения состояния, описывающего термические и калорические свойства воды и водяного пара в широком диапазоне параметров.

Л и т е р а т у р а

1. Степанчук В.Ф. Относительно общего вида калорического уравнения реального газа. - Изв. вузов СССР. Энергетика, 1970, № 6. 2. Вукалович М.П. и др. Таблицы теплотехнических свойств воды и водяного пара. М., 1969. 3. Равкин С.Л. и др. Теплотехнические производные для воды и водяного пара. М., 1977.

УДК 621.78.013.002.5

М.М.Сбитнева, канд.техн.наук

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КАНАЛА РЕЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ПЕЧИ

При проектировании рециркуляционных печей с центробежными вентиляторами [1, 2] необходимо определение оптимальной скорости воздушного потока во избежание получения брака продукции. Для изменения скорости потока в непосредственной близости от вентилятора устанавливается диафрагма. Она вносит дополнительные местные потери, которые с учетом потерь на трение вдоль канала определяют скорость аэродинамического потока в канале при заданной мощности вентилятора.

Для расчета скорости определим потери напора за счет преодоления местного сопротивления диафрагмы и на трение [3].

Потери напора на преодоление местного сопротивления в виде диафрагмы рассчитывают по формуле

$$h_{\text{м}} = \xi \frac{v^2}{2g}, \quad (1)$$

где $h_{\text{м}}$ – величина потери напора на диафрагме, м; ξ – коэффициент местного сопротивления; v – скорость потока за диафрагмой, м/с.

Как известно, для аэродинамических потоков потери напора на местные сопротивления значительнее, чем на трение, и поэтому составляют существенную часть от общих потерь в замкнутом циркуляционном контуре.

Коэффициент местного сопротивления диафрагмы по формуле Борда будет следующий:

$$\xi_{\text{д}} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_3 \varepsilon} - 1 \right)^2, \quad (2)$$

где ω_3 – площадь сечения диафрагмы, м²; ω_2 – площадь сечения канала за диафрагмой (3,3 x 0,5 м²); ε – коэффициент сжатия струи.

Для нашего случая истечение струи из плоской щели для определения коэффициента сжатия струи можно использовать теоретическую формулу Жуковского

$$\varepsilon = \frac{\pi}{\pi + 2 \frac{2\varphi}{\text{tg} 2\varphi}}, \quad (3)$$

где φ определяется из выражения

$$\text{tg} \varphi \left(1 + \frac{2}{\pi} \frac{2\varphi}{\text{tg} 2\varphi} \right) = n, \quad (4)$$

где $n = \frac{\omega_3}{\omega_1}$ – степень сжатия потока; ω_1 – площадь сечения канала до диафрагмы, м².

В нашем случае $\omega_1 = \omega_2$, так как диафрагма установлена в канале постоянного поперечного сечения. Варьируя площадью диафрагмы так, чтобы степень сжатия потока лежала в пределах от 0,1 до 0,6, получим значение коэффициента местного сопротивления для диафрагмы:

n	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$\xi_{гг}$	284	50,3	19,9	9,8	4,4	2,4

Потери напора на трение вдоль канала определяются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$h_{тр} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad (5)$$

где l - длина канала, м ($l = 12,8$ м); d - эффективный диаметр канала, м ($d \approx 1,3$ м); λ - коэффициент гидравлического трения для воздухопроводов.

Коэффициент гидравлического трения зависит от двух безразмерных величин: от относительной шероховатости и от числа Рейнольдса. Из опытных результатов [4] следует, что при значениях числа Рейнольдса порядка $5 \cdot 10^5$ и при относительной шероховатости порядка 0,001 коэффициент гидравлического трения не зависит от вязкости и сохраняет постоянное значение. Канал в этом случае можно рассматривать как вполне шероховатый.

Коэффициент гидравлического трения для воздухопроводов находим по формуле Блесса для случая турбулентного течения

$$\lambda = 0,0125 + \frac{0,0011}{d} \approx 0,014. \quad (6)$$

Поток имеет на своем пути 4 поворота. Потери напора, связанные с изменением направления потока, можно определить, используя формулу Борда:

$$h_{1к} = \frac{v^2}{2g} \left(\frac{1}{\epsilon} - 1 \right)^2. \quad (7)$$

При прямоугольной форме поворота коэффициент сжатия струи равен 0,5 ($\epsilon = 0,5$) и коэффициент местного сопротивления колена равняется

$$\xi_{гк} = \left(\frac{1}{\epsilon} - 1 \right)^2 = 1. \quad (8)$$

Поэтому потерю напора на всех четырех коленах можно принять равной

$$h_{4к} = \frac{2v^2}{g} = 4 \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

Полный напор, создаваемый в канале вентилятором, расходуется на потери напора на диафрагме, при поворотах и на трение

$$h = h_g + h_{тр} + h_{4к} = \left(\xi_g + \lambda \frac{1}{d} + \xi_{4к} \right) \frac{v^2}{2g} \quad (10)$$

Учитывая, что $\frac{1}{d} \approx 10$ и $\lambda = 0,014$ можно заключить, что

$$\lambda \frac{1}{d} \ll \xi_g$$

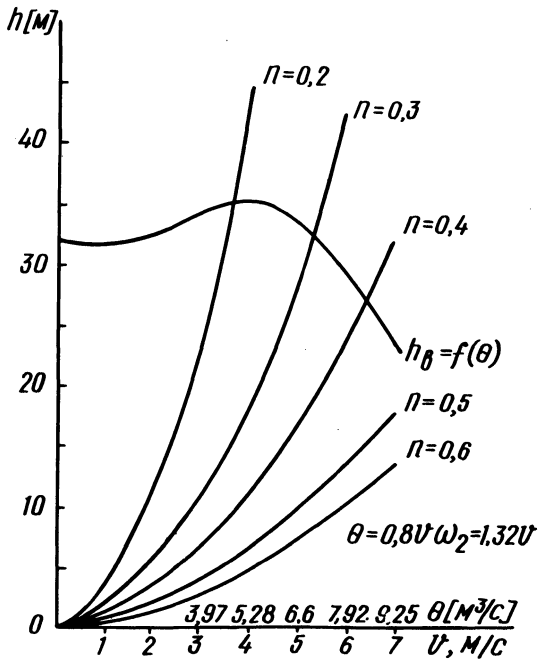


Рис. 1. Полные потери напора в аэродинамическом канале ПАП при различном дросселировании.

Таблица 1. Аэродинамический расчет канала с диафрагмой

v	1	2	3	4
$\frac{v^2}{2g}$	0,05	0,2	0,45	0,8
$\frac{v^2}{2g}$	0,32	1,3	2,88	5,1
$\frac{v^2}{2g}$	0,42	1,68	3,78	6,72
$h_g = (\xi_{g+4})$	0,69	2,76	6,21	11,04
	1,195	4,78	10,755	19,12
	2,715	10,9	24,4	43,4
v_{cp}	0,8	1,6	2,4	3,2
$\theta = \omega_2 v_{cp}$	1,32	2,64	3,97	5,28

Примечание. ω_3 - сечение диафрагмы; ω_2 - сечение канала за диафрагмой.
Тогда

$$h = (\xi_{g+4k}) \frac{v^2}{2g}. \quad (11)$$

Потери напора в канале и его производительность одно-значно зависят от скорости потока. Задавая скорости, рассчиты-вают основную характеристику канала

$$\theta = f(h). \quad (12)$$

Здесь $\theta = \omega_2 v_{cp}$ - производительность канала, м³/с; $h = (\xi_{g+4}) \frac{v^2}{2g}$ - потери напора, м; $v_{cp} = 0,8$, м/с; v - максимальное значение скорости в поперечном сечении канала.

5	6	7	$n = \frac{\epsilon_3}{\epsilon_2}$	$\epsilon_{2g} + 4$
1,25	1,8	2,45	-	-
8	11,52	15,68	0,6	6,4
10,5	15,12	20,58	0,5	8,4
17,25	24,84	33,81	0,4	13,8
29,88	43	58,55	0,3	23,9
68	97,7	134,0	0,2	54,3
4	4,8	5,6	-	-
6,6	7,92	9,25	-	-

Эта характеристика для различных сечений диафрагмы приведена на рис. 1, промежуточные данные помещены в табл.1.

На этом же графике нанесена характеристика вентилятора. Как известно, рабочей точкой вентилятора в канале с заданным дросселированием является точка пересечения характеристик канала и вентилятора. В случае работы рециркуляционной печи решается обратная задача: по ограничению скорости (4 м/с) определяется необходимое дросселирование. Так, для конкретного случая, отображенного на рис. 1, необходимое дросселирование соответствует $n = 0,35$, т.е. дроссельное отверстие должно составлять 35% от сечения канала.

Максимальный КПД использования энергии в рассматриваемом случае соответствует производительности 6-7 м³/с, а при данной конфигурации канала скорости потока 5-6 м/с. Передвинуть рабочую точку в сторону увеличения производительности можно только изменив конфигурацию канала вблизи вентилятора (спрямить разделительный экран и расширить канал). В этом случае за счет уменьшения скорости в суженной части

канала допустимая с технологической точки зрения скорость в рабочей части рециркуляционной печи увеличивается. Это увеличение можно определить только экспериментальным путем. Увеличение скорости и соответствующей производительности поведет к возможности уменьшения дросселирования, что в свою очередь вызовет повышение температуры — улучшения теплового режима и приближения его к технологическому оптимуму, т.е. решит основную задачу: определения внутреннего сечения рабочей части печи соответствующей одновременно оптимальному с технологической точки зрения тепловому режиму и допустимому динамическому режиму.

Л и т е р а т у р а

1. Тархановский В. Вентилятор накаляет детали. — Изобретатель и рационализатор, 1967, № 9. 2. Бромлей М.Ф. Гидравлические машины и холодильные установки. М., 1971. 3. Калицун В.И. и др. Основы гидравлики, водоснабжения и канализации. М., 1972. 4. Альтшуль А.С. Гидравлика и аэродинамика. М., 1965.

УДК 536.244

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ САМОРЕГУЛИРУЕМОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА С ДВИЖУЩЕЙСЯ ТЕПЛОВОЙ ВОЛНОЙ

В [1] рассмотрена методика расчета параметров саморегулируемого источника тепла, предназначенного для термической обработки пористых тел в режиме незатухающих тепловых волн. Саморегулируемый источник тепла (рис. 1) представляет собой цепь последовательно соединенных электрического нагревателя (спирали) 1 и термочувствительного элемента (термистора) 2, подсоединенных к источнику постоянного напряжения. Когда тепловая волна еще не достигла источника тепла (положение I, рис. 1, 2) и он находится в холодном потоке, термистор имеет высокое сопротивление и источник отключен. По мере повышения температуры потока (положение II, рис. 1) источник включается, выходит на номинальный режим (положение III, рис. 1), а затем отключается (положение IV, рис. 1).

Если применить метод разложения экспоненты, то мощность, выделяемая на термисторе, опишется выражением (кривая 1, рис. 2)

$$\bar{W}_T = \frac{W_T}{W_0} = \frac{\bar{R}}{(1+\bar{R})^2}; \quad W_0 = \frac{U^2}{R_{сп}}; \quad (1)$$

$$\bar{R} = \frac{R_{сп}}{R_T} = \exp \theta; \quad \theta = \alpha_T t + \ln \frac{R_{сп}}{R_0},$$

которое следует рассматривать вместе с уравнением конвективного теплообмена (система прямых I-IY, рис. 2)

$$\bar{W}_\Pi = K(\theta - \theta_\Pi); \quad K = \frac{\alpha S}{\alpha_T W_0}; \quad \theta_\Pi = \alpha_T t_\Pi + \ln \frac{R_{сп}}{R_0}, \quad (2)$$

Здесь α_T - температурный коэффициент сопротивления, t - температура; R - сопротивление; W - мощность; R_0 - сопротивление термистора при $t = 0$; α , S - коэффициент и поверхность теплообмена термистора; индексы: сп - относится к спирали; т - термистору, п - потоку.

Относительные мощности, выделяемые на спирали $W_{сп}$ (кривая 2, рис. 2) и всех источниках \bar{W}_Σ (кривая 3), определяются так:

$$\bar{W}_{сп} = \frac{W_{сп}}{W_0} = \bar{R} W_T; \quad \bar{W}_\Sigma = \frac{W_\Sigma}{W_0} = \sqrt{\bar{W}_{сп}}.$$

Эффект включения и отклонения источника тепла связан с положением прямой конвективного охлаждения (прямые I-- IY, рис. 2) относительно кривой мощности 1. Согласно (2) смещение прямой может быть достигнуто не только за счет изменения температуры потока t_Π , но и изменения сопротивления спирали $R_{сп}$. Эта закономерность положена в основу экспериментального моделирования взаимодействия саморегулируемого источника тепла с движущейся тепловой волной.

На рис. 3. показана схема экспериментальной установки. Здесь же указаны значения дополнительных сопротивлений в позициях переключателя I-X ($i = 1-10$), соответствующие изменению температуры потока в пределах от 20°C (температу-

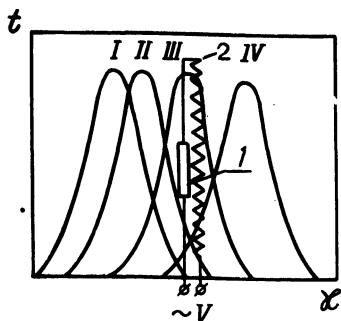


Рис. 1. Относительные положения тепловой волны (I, II, III, IV): 1 – термистор; 2 – электрический нагреватель.

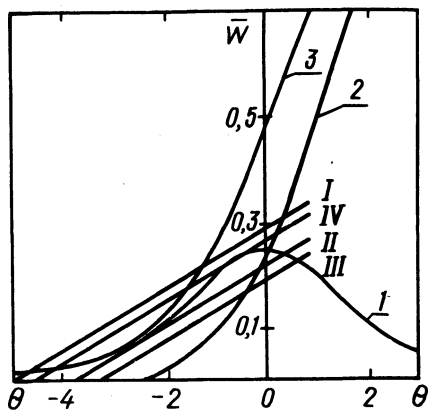


Рис. 2. Кривые относительных мощностей, выделяемых на термисторе 1, спирали 2, источнике 3; I, II, III, IV – прямые конвективного охлаждения при различном положении тепловой волны и термистора.

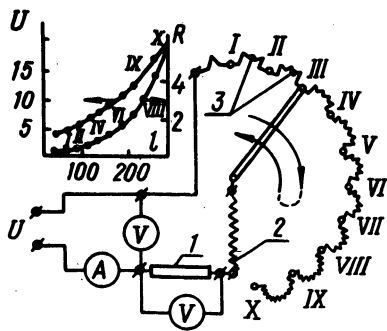


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – термистор СТ2-27; 2 – спираль; 3 – дополнительные сопротивления.

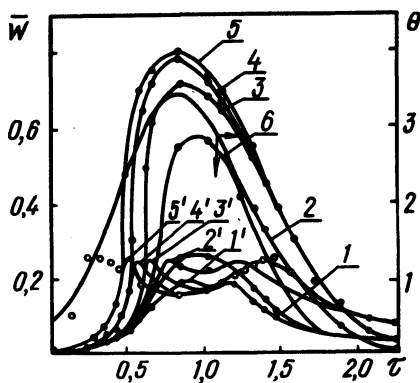


Рис. 4. Кривые относительных мощностей, выделяемых на термисторе (1–5') и источнике (1–5), при взаимодействии его с тепловыми волнами разной толщины: 1 – $\delta = 0,05$ м; 2 – 0,1; 3 – 0,2; 4 – 0,4 волны. Экспериментальные точки соответствуют равновесным значениям относительной мощности термистора.

ра среды в эксперименте) до 300°C (амплитуда тепловой волны) с шагом $\Delta t = 28^{\circ}\text{C}$

$$\ln \frac{R_i}{R_{\text{сп}}} = \alpha_T i \Delta t \quad (i=1,2,\dots,10).$$

Сопротивление спирали $2 R_{\text{сп}}$ (рис. 3) равно $0,2 \text{ Ом}$, величина α_T в исследуемом диапазоне температур принята равной $0,0123 \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$. Предельная мощность W_0 выбрана из соображений допустимой силы тока на термисторе $5,5\text{А}$ и равна $72,6 \text{ Вт}$. Величина напряжения на источнике корректировалась с подключением каждого дополнительного сопротивления исходя из требований постоянства величины K в уравнении (2). Соответствие напряжения величинам подключаемых сопротивлений показано на рис. 3.

На рис. 4 представлены графики изменения мощности, выделяемой на термисторе и всем источнике для различных масштабов тепловой волны, задаваемых ее приведенной толщиной

$$\delta = \frac{1}{t_{\text{max}} - t_0} \int_{-\infty}^{+\infty} (t - t_c) dx.$$

Моменты прямого и обратного переключения сопротивлений в позициях I-X ($i = 1-10$) с целью воспроизведения гауссовского профиля тепловой волны (кривая 6, рис. 4) определялись по формуле

$$\tau = \frac{\delta}{u\sqrt{\pi}} \bar{\tau} ; \quad \bar{\tau} = \sqrt{\ln 10} \mp \sqrt{\ln(10/i)}. \quad (3)$$

Знак "минус" в уравнении (3) соответствует прямому переключению сопротивлений ($i = 1,2, \dots, 10$, восходящая ветка температурной кривой), "плюс" - обратному ($i = 10, 9, \dots, 1$, нисходящая ветка).

Скорость движения тепловой волны принята равной $u = 0,265 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$, что соответствует скорости фильтрации потока воздуха $0,2 \text{ м/с}$ через слой цеолита.

Л и т е р а т у р а

1. Заватко А.М. и др. Моделирование реакционного теплообмена при термической обработке плотного слоя в режиме тепловых волн. - В сб. Научные и прикладные проблемы энергетики, вып. 5. Минск, 1978.

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДИСПЕРСНОГО АДСОРБЕНТА
СО СТЕНКАМИ КАНАЛА ПРИ ПНЕВМОТРАНСПОРТЕ

Исследования и анализ работы [1] существующих адсорберов непрерывного действия показывают, что в ряде случаев потери адсорбентов от истирания в кипящем и движущихся слоях и при пневмотранспорте настолько значительны, что делают применение подобных адсорберов экономически нецелесообразным. В большинстве случаев решающее влияние на исторание адсорбентов оказывают условия пневмотранспорта. Для уменьшения потерь сорбента рекомендуется применять комплекс мер по предотвращению ударного контакта частиц с металлическими деталями.

В данной работе приводятся результаты аналитического исследования изменения ударного взаимодействия частиц микродисперсного адсорбента с поверхностью трубопровода в результате воздействия на поток неравномерного температурного поля.

Известно [2], что в неравномерном температурном поле на частицу сорбента действует сила сорбофореза, вызванная неравномерным выходом по поверхности частицы десорбируемого газа. Направление силы противоположно направлению температурного градиента. Следовательно, если при пневмотранспорте насыщенного адсорбента тепловой поток направлен от стенок канала к центру, то сорбофорез препятствует движению частиц потока к периферии. В то же время ударное взаимодействие дисперсной фазы потока со стенками канала характеризуется в первую очередь величиной радиальной скорости в момент соударения. Таким образом, уменьшение износа адсорбента от ударного взаимодействия в первом приближении можно оценить как уменьшение величины радиальной скорости столкновения.

Для микродисперсного адсорбента величину радиальной скорости столкновения частицы со стенкой можно определить как результат расчета процесса торможения частицы в пристенной области потока с начальной скоростью, приобретенной частицей в результате турбулентности потока. Решения дифференциальных уравнений радиального движения в этом случае для инертной и насыщенной частиц приведены в [2].

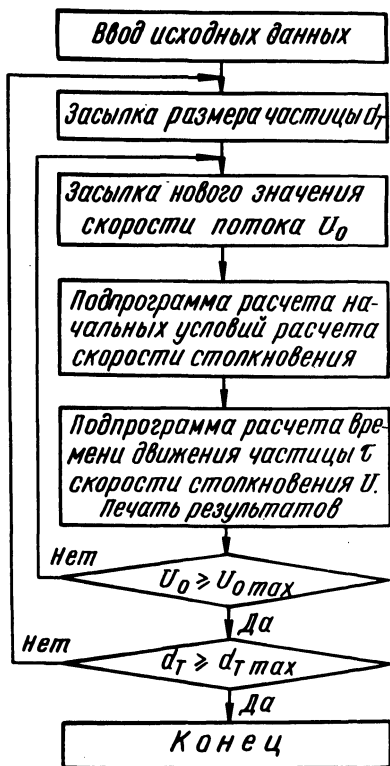


Рис. 1. Блок-схема расчета коэффициента уменьшения скорости для области обтекания по Стоксу и весовой концентрации $\leq 2 \div 3$ кг/кг.

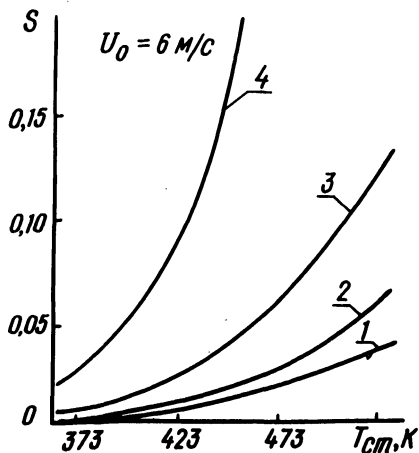


Рис. 2. Зависимость S от диаметра частицы d_T и температуры стенки канала $T_{ст}$ для цеолита MgA: 1, 2, 3, 4 – соответственно при $d_T = 125, 100, 75$ и 50 мкм.

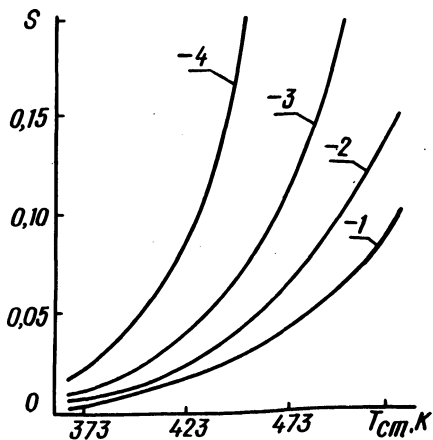


Рис. 3. Зависимость S от скорости потока u_0 для цеолита CaA: 1, 2, 3, 4 – соответственно при $u_0 = 12, 10, 8, 6$ м/с.

На основании этих решений был проведен расчет коэффициента уменьшения скорости соударения для области обтекания по Стоксу и для весовой концентрации $\mu \leq (2-3)$ кг/кг. Укрупненная блок-схема расчета на ЭВМ приведена на рис. 1.

Средняя пульсационная скорость частиц вычислялась согласно выражений [3]:

$$u_{\text{то}} = \sum_{k=1}^{\infty} u_{\text{так}} \sin(k \omega \tau + \varepsilon_k + \psi_k);$$

$$u_{\text{так}} = u_{\text{ак}} \sqrt{\left[\left(\frac{1,5\rho}{\rho_T + 0,5\rho} \right)^2 + \text{tg}^2 \varphi_k \right] / (1 + \text{tg}^2 \varphi_k)}; \quad (1)$$

$$\text{tg} \varphi_k = 0,75 c_f \rho u_{\text{от}} / d_T k \omega (\rho_T + 0,5\rho);$$

$$\sin \psi_k = \sin \varphi_k / u_{\text{так}}.$$

Время движения частиц в пристенной области потока определялось из рекуррентных уравнений

$$\tau_a = (\tau_{pe} / a_0) \left\{ d_T - \delta + \tau_{pe} [1 - \exp(-\tau_a / \tau_{pe})] (u_0 + a_0 / \tau_{pe}) \right\}; \quad (2)$$

$$\tau_u = -(\delta - d_T) \left\{ u_0 [1 - \exp(-\tau_u / \tau_{pe})] \right\}.$$

В результате вычисления находились скорости столкновения частиц со стенкой и коэффициент уменьшения скорости соударения S для различных параметров и условий движения потока.

Полученные результаты расчета частично отражены на рис. 2 и 3. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что коэффициент уменьшения скорости соударения изменяется в довольно широких пределах в зависимости от изменения параметров двухфазного потока и условий нагрева среды. Очевидно, что дальнейшие разработки в этом направлении позволят использовать этот способ в практике. В дальнейшем необходимо проведение как аналитических исследований с даль-

нейшим уточнением физической модели процесса, так и экспериментальное исследование влияния параметров теплового поля на истирание адсорбента в процессах десорбции в потоке.

Л и т е р а т у р а

1. Романьков Л.Г., Лепилин В.Н. Непрерывная адсорбция паров и газов. Л., 1968. 2. Седнин В.А. Определение влияния сорбционных сил на движение тонкодисперсного адсорбента. - В сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики, вып. 4. Минск, 1977. 3. Горбис З.Р., Календерьян В.А. Теплообменники с проточными дисперсными теплоносителями. М., 1975.

УДК 62 - 68:658.26

Ю.В.Пинчук

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБРАТНОЙ СЕТЕВОЙ ВОДЫ ДЛЯ СБОРА ИЗБЫТОЧНОГО ТЕПЛА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В настоящее время тепло вторичных энергоресурсов используется в рекуператорах, контактных экономайзерах, котлах-утилизаторах и др. Однако использование вторичного тепла в указанных теплообменных аппаратах является неполным, так как практически температура уходящих газов после рекуператоров доходит до 800°C . В некоторых устройствах (например, закалочный бак термической печи) тепло нагретого металла перед закалкой вообще не может быть использовано из-за низкой температуры воды в закалочном баке.

Сложность наиболее полного комплексного использования тепла вторичных энергоресурсов заключается в их многообразии как по видам, так и по температурному потенциалу. Если в интервале высоких температур вторичные энергоресурсы могут быть использованы известными методами [1], то в интервале пониженных температур вторичные энергоресурсы (ВЭР) не всегда могут быть непосредственно применены на предприятии из-за отсутствия потребителя и несоответствия режимов работы теплотехнологических и теплоиспользующих установок, недостаточной экономической их эффективности.

Наиболее перспективным является такой метод использования тепла вторичных энергоресурсов, который обеспечивает повышение экономичности технологического процесса и комплексное использование вторичного тепла различного температурного

потенциала от различных элементов технологических установок.

Сущность метода заключается в том, что отвод тепла из промежуточного теплообменника осуществляется обратной сетевой водой отопительной сети, которая нагревается до температуры не выше температуры кипения при данном давлении воды в сети.

Приведенный метод является первым начальным этапом с последующим максимальным использованием ВЭР непосредственно на предприятии, что в сумме обеспечивает наибольшую экономию затрат.

По предлагаемому методу (рис. 1) уходящие газы промышленной печи отдают тепло сетевой воде в теплообменник 1, 2 (глиссажные трубы) и 3 (закалочный бак, где отдается тепло нагретого металла перед закалкой).

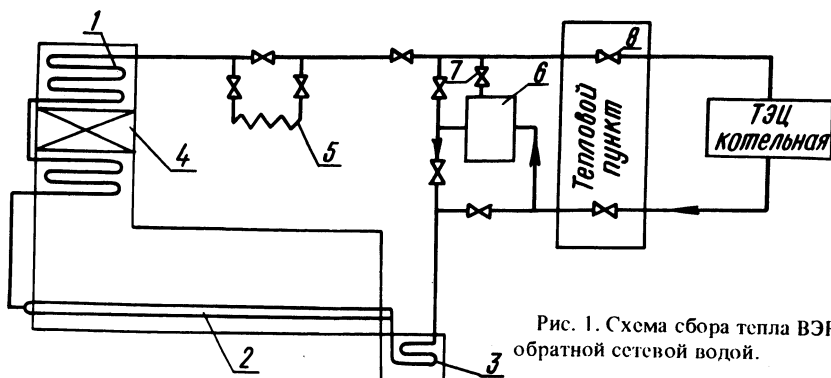


Рис. 1. Схема сбора тепла ВЭР обратной сетевой водой.

Нагретая сетевая вода с температурой меньшей, чем температура кипения при данном давлении, направляется на ТЭЦ или котельную, где, если это необходимо, доводится до температуры в соответствии с графиком и затем используется для отопления и горячего водоснабжения существующих и вновь вводимых потребителей. Теплообменник 1 устанавливается обычно с рекуператором 4, но может быть установлен и отдельно. В схему могут подключаться и другие источники ВЭР 5. Подогретая за счет ВЭР вода может использоваться как непосредственно в схеме теплоснабжения цеха 6 через задвижку 7, так и передаваться в энергосистему через задвижку 8.

Анализ тепловых нагрузок и использования топлива в промышленности г. Минска, который был выполнен Белорусским филиалом ЭНИНа им. Г.М.Кржижановского при разработке топливно-энергетического баланса БССР, показывает, что в теп-

лофикационную систему города возможно передать до 300 МВт тепла ВЭР предприятий.

Формирование тепловых мощностей промышленного района рассматривалось как с ТЭЦ, так и с котельными.

Во всех случаях экономия топлива от использования ВЭР промышленности определялась по известной методике [2], в соответствии с которой экономия топлива ($\Delta V_{\text{ВЭР}}$) при передаче тепла ВЭР на ТЭЦ несколько ниже, чем в котельную. Однако временное снижение загрузки отбора турбины восстанавливается за счет подключения дополнительных потребителей тепла ТЭЦ. В целом можно считать, что $\Delta V_{\text{ВЭР}} = 0,04 \text{ т. у. т. / ГДж.}$

Наличие тепловых сетей и разводок во всех цехах предприятий, значительное упрощение утилизационных устройств по нагреву сетевой воды в сравнении с котлами-утилизаторами, рекуператорами и другими установками обеспечивает также и экономию капитальных вложений. Например, расчеты показывают, что вариант с установкой на нагревательных печах и других установках, сжигающих газ, однорядного рекуператора (обеспечивая подогрев воздуха до 300°C) и дополнительных поверхностей, охлаждаемых сетевой водой по приведенным затратам, на 20-30% лучше, чем вариант с установкой многоступенчатого рекуператора.

Внедрение приведенного метода теплофикационного преобразования ВЭР дает экономию топлива по г. Минску до 100 тыс. т у.т./год.

Л и т е р а т у р а

1. Семененко Н.А. Организация теплоиспользования и энерготехнологическое комбинирование в промышленной огнетехнике. М., 1976. 2. Методика определения выхода экономической эффективности использования ВЭР. М., 1972.

УДК 66.074.8

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

ЭКСТРЕМУМЫ КРИТЕРИЕВ ТЕРМОДЕСОРБЦИОННОГО ПРОЦЕССА В ПОТОКЕ ТВЕРДОГО АДСОРБЕНТА

Во многих технологических процессах производится очистка газовых смесей от углекислоты. При этом решающую роль играет стадия термической десорбции, оптимальное проведение которой значительно увеличивает эффективность работы промышленных установок.

Исследования производились на экспериментальной установке полуразомкнутого типа в потоке типа "газовзвесь". В качестве адсорбента применялся синтетический микросферический цеолит MgA со средним размером частиц 50 мкм. Транспортирующей средой служил воздух, предварительно осушенный. Нагрев поверхности десорбера осуществлялся постоянным током, температура стенки которого в опытах поддерживалась постоянной.

В качестве критериев термодесорбционного процесса использовались полнота десорбции a (отношение количества десорбированного газа к поглощенному цеолитом) и удельные энергозатраты на десорбцию q (количество тепла, затраченное на нагрев цеолита и десорбцию 1 кг углекислого газа).

Математическая формулировка задачи следующая:

$$a = f(T, \mu, a_c, Re) = \max; \quad (1)$$

$$q = f(T, \mu, a_c, Re) = \min. \quad (2)$$

Задача решалась в два этапа. На первом этапе отыскивался район оптимума методом "крутого восхождения" [1] после реализации полного факторного эксперимента; затем в найденном центре эксперимента реализовывался центральный композиционный униформ-рототабельный план второго порядка. Полнота десорбции находилась из тех же опытов, что и удельные энергозатраты.

В результате были получены следующие уравнения регрессии, адекватно представляющие результаты эксперимента

$$a = 30,9 + 10,0x_1 + 1,7x_2 + 10,6x_3 + 3,1x_4 - 0,9x_1^2 - 0,4x_2^2 - 1,8x_3^2 - 0,2x_4^2; \quad (3)$$

$$q = 2394 - 784x_1 - 1139x_2 - 2122x_3 - 962x_4 + 181x_1x_2 + 255x_1x_3 + 120x_1x_4 + 535x_2x_3 + 254x_2x_4 + 573x_3x_4 + 276x_1^2 + 383x_2^2 + 757x_3^2 + 136x_4^2$$

Из анализа формул (3) и (4) следует, что задача оптимизации термодесорбционного процесса не имеет однозначного решения. Минимальному значению удельных энергозатрат на

десорбцию соответствует полнота десорбции только 50%. Поэтому задача оптимизации термодесорбционного процесса должна решаться как компромиссная. Нами она была решена графическим методом [1].

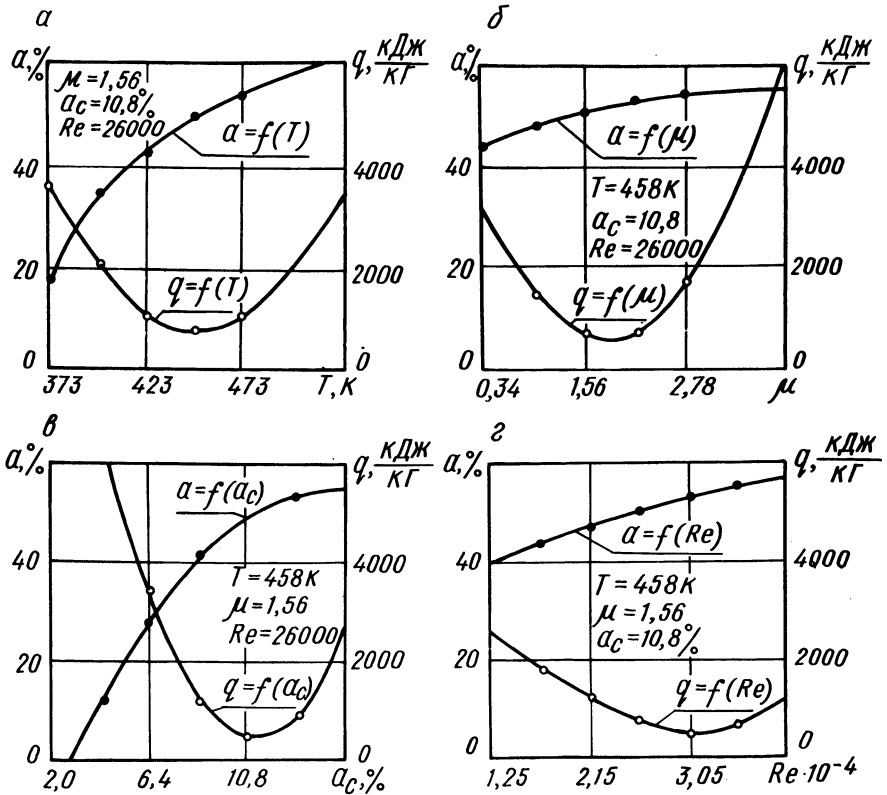


Рис. 1. Зависимость полноты десорбции и удельных энергозатрат на десорбцию CO_2 для цеолита MgA от температуры поверхности десорбера (а); концентрации цеолита в потоке (б); сорбционной емкости цеолита (в) и числа Re потока (г).

На рис. 1, а-г показаны зависимости полноты десорбции и удельных энергозатрат от различных факторов. С учетом ограничений на факторы - $2 \leq x_1 \leq 2$ (температура поверхности десорбера в опытах менялась от 100 до 200⁰С); $-2 \leq x_2 \leq 2$ (расходная концентрация цеолита в потоке изменялась от 0,34 до 2,78 кг час/кг час); $-2 \leq x_3 \leq 2$ (сорбционная емкость цеолита менялась в пределах 4,2...13%); $-2 \leq x_4 \leq 2$ (число Рейнольдса изменялось от 17000 до 35000, что соответствовало изменению скорости потока от 8 до 16 м/с) и

с учетом технологических требований установили, что необходимые значения критериев оптимизации достигаются в точках со следующими координатами:

$$x_1 = 2 (T=473K); x_2 = 1 (\mu = 2,17);$$

$$x_3 = 1,6 (a_c = 12\%); x_4 = 2 (Re = 35,0 \cdot 10^4).$$

При выбранных условиях процесс термической десорбции в потоке синтетического цеолита характеризуется следующими показателями: удельные энергозатраты на десорбцию CO_2 $q = 3500$ кДж/кг при полноте десорбции $a = 67\%$.

Л и т е р а т у р а

1. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента, М., 1974.

УДК 621.78.001.24

В.Ф.Кравец, канд.техн.наук,
А.П.Несенчук, канд.техн.наук,
Ю.А.Малевиц, канд.техн.наук.

НАГРЕВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ САДКИ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ В ПЕЧАХ ОТДЕЛЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНО-КОВОЧНЫХ МАШИН (ГКМ)

Наибольший интерес представляет задача о нагреве цилиндрической садки в зоне выдержки печи для всего типоряда нагреваемых заготовок и различных значений температуры газов в зоне. Задача решается при граничных условиях I рода с помощью ЭВМ.

В основу решения положены имеющиеся формулы, полученные на основе решения дифференциального уравнения теплопроводности при граничных условиях I рода (тело произвольной формы) [1]

$$\frac{T_c - T(r, z, \tau)}{T_c - T_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_n A_m J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \times$$

$$x \cos \mu_n \frac{z}{l} e^{-(\mu_n^2 + \mu_m^2 k_1) Fo},$$

$$\text{где } A_n = \frac{2}{\mu_n J_1(\mu_n)}; A_m = (-1)^{m+1} \frac{2}{\mu_m};$$

$$\mu_m = (2m-1) \frac{\pi}{2}; h_1 = R/l.$$

Нас будет интересовать задача

$$W = \tau (\bar{R}, \bar{X}, \bar{T}), \quad (2)$$

где W – заданная температура поверхности нагреваемого тела.

Поскольку функция $\tau(\bar{R}, \bar{X}, \bar{T})$ монотонна и дифференцируется по всем аргументам, а прямая задача ($T = T(\bar{R}, \bar{X}, \tau)$) температурном поле решена, то уравнение (2) возможно и целесообразно решать с помощью метода секущих.

Для задачи, касающейся определения времени нагрева в общем виде, записываем

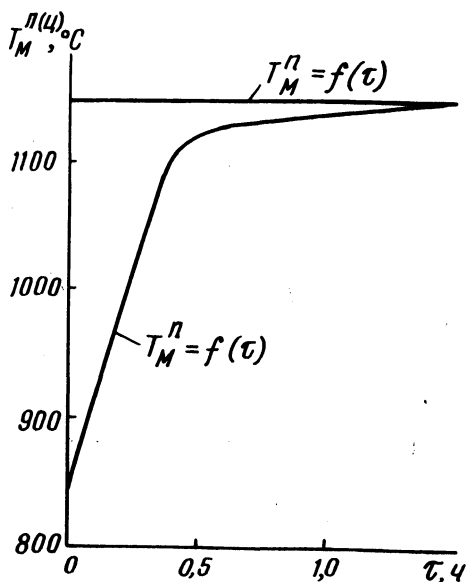


Рис. 1. График зависимости $T_M^n = f(\tau)$ для цилиндрической заготовки конечных размеров.

а) a, λ, α, J_0 – постоянные величины,

б) $\bar{R} = \bar{R}_1(H_1)R_2;$

$x = 0(H_x)1;$

(3)

$$\left. \begin{aligned} T &= T_1(H_T)T_2; \\ W &= W_1(H_W)W_2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для исходных данных (3) находим корень ζ уравнения

$$T(\bar{R}, \bar{X}, T) = W.$$

В соответствии с разработанной программой ("фортран", ЭВМ "Минск-32") рассчитываем время нагревания (выдержки) заготовок в нагревательной печи участка ГКМ.

$$\text{Дано: } \left(\frac{r}{R}\right) = 0; \left(\frac{z}{L}\right) = 0; L = 0,2; R = 0,1 \text{ м};$$

$$T_{M_{\text{кон}}}^{\text{II}} = 1150; T_{M_{\text{нач}}}^{\text{II}} = 850; T_M^{\text{II}} = 1150^{\circ}\text{C}; a = 0,025 \text{ м}^2/\text{ч};$$

$$\lambda = 40 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}; \alpha = 200 \text{ Вт/м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Результаты расчета показаны на рис. 1.

Л и т е р а т у р а

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

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.1:537.312.62

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

КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С КООКСИАЛЬНЫМИ ФАЗАМИ

Ввиду сложности физических процессов в линиях электропередачи с коаксиальными фазами (газовых, криогенных и др.) не всегда удается наглядно описать аналитические связи между отдельными параметрами. В этих условиях может оказаться полезным для анализа параметров различных линий и их моделей применение методов теории подобия.

Получим критерии подобия применительно к сверхпроводящим линиям. Для этого воспользуемся методом анализа размерностей [1] и процедурой его применения, описанной в [2].

Для линий электропередачи со сверхпроводниками первого рода или сверхпроводниками второго рода, работающими при напряженности поля меньше первого критического поля ($H < H_{k1}$), т.е. когда ток имеет место только на поверхности сверхпроводника, в качестве определяющих величин могут быть приняты следующие [3]: расчетная мощность линии P , напряжение между проводниками коаксиальной фазы U , напряженность первого критического поля H_{k1} при данной рабочей температуре фаз, электрическая прочность электроизоляции $E_{пр}$, абсолютная магнитная проницаемость электроизоляции μ , абсолютная электрическая проницаемость электроизоляции ϵ , угловая частота ω , удельное реактивное сопротивление линии x_{Ω} , удельная реактивная проводимость b_{Ω} , коэффициент запаса по критическому току сверхпроводника k_I , коэффициент запаса по электрической прочности изоляции k_U .

Формулы размерностей этих величин в СИ имеют вид:

$$\begin{aligned} [P] &= L^2 M T^{-3}; [U] = L^2 M T^{-3} I^{-1}; [H_{k1}] = L^{-1} I; [E_{пр}] = \\ &= L M T^{-3} I^{-1}; [\mu] = L M T^{-2} I^{-2}; [\epsilon] = L^{-3} M^{-1} T^4 I^2; [\omega] = T^{-1}; \\ [x_{\Omega}] &= L M T^{-3} I^{-2}; [b_{\Omega}] = L^{-3} M^{-1} T^3 I^2; [k_I] = 1; k_U = 1. \end{aligned}$$

Таким образом, все определяющие величины выражены через $q = 4$ единиц измерений (L, M, T, I).

Поскольку величины k_I и k_U — безразмерные, то сразу можно записать два критерия подобия:

$$\pi_1 = k_I; \quad \pi_2 = k_U.$$

Из остальных величин составим степенную функцию

$$\Phi = P^a U_k^b H_{k1}^c E_{пр}^d \mu^e \epsilon^f \omega^g x_o^p b_o^r, \quad (1)$$

имеющую размерность

$$[\Phi] = [L^2 M T^{-3}]^a [L^2 M T^{-3} I^{-1}]^b [L^{-1} I]^c [L M T^{-3} I^{-1}]^d \times \\ \times [L M T^{-2} I^{-2}]^e [L^{-3} M^{-1} T^4 I^2]^f [T^{-1}]^g [L M T^{-3} I^{-2}]^p \times \\ \times [L^{-3} M^{-1} T^3 I^2]^r = 1.$$

Составим отсюда систему из $q = 4$ уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 2a+2b-c+d+e-3f+p-3r &= 0; \\ a+b+d+e-f+p-r &= 0; \\ -3a-3b-3d-2e+4f-g-3p+3r &= 0; \\ -b+c-d-2e+2f-2p+2r &= 0; \end{aligned} \right\}$$

Выразим отсюда a, b, c, g через d, e, f, p, r :

$$\begin{aligned} a &= d+2e+2p; \\ b &= -2d-3e+f-3p+r; \\ c &= -d-e-f-p-r; \\ g &= e+f. \end{aligned} \quad (2)$$

Подставляя значения из (2) в (1), получим

$$\Phi = P^{d+2e+2p} U_k^{-2d-3e+f-3p+r} H_{k1}^{-d-e-f-p-r} \times$$

$$x E_{\text{пр}}^d \mu^e \varepsilon^f \omega^{e+f} \cdot \underset{\circ}{p} \underset{\circ}{b} \underset{\circ}{r},$$

или

$$\phi = (P U_k^{-2} H_{k1}^{-1} E_{\text{пр}})^d (P^2 U_k^{-3} H_{k1}^{-1} \mu \omega)^e (U_k H_{k1} \varepsilon \omega)^f x$$

$$x (P^2 U_k^{-3} H_{k1}^{-1} x_o)^p (U_k H_{k1}^{-1} b_o)^r.$$

Отсюда получим критерии подобия

$$\pi_3 = \frac{P E_{\text{пр}}}{U_k^2 H_{k1}}; \quad \pi_4 = \frac{P^2 \mu \omega}{U_k^3 H_{k1}}; \quad \pi_5 = \frac{U_k \varepsilon \omega}{H_{k1}};$$

$$\pi_6 = \frac{P^2 x_o}{U_k^3 H_{k1}}; \quad \pi_7 = \frac{U_k b_o}{H_{k1}}.$$

Преобразуем полученные критерии

$$\pi_4' = \frac{\pi_4}{\pi_6} = \frac{\omega \mu}{x_o}; \quad \pi_5' = \frac{\pi_5}{\pi_7} = \frac{\omega \varepsilon}{b_o};$$

$$\pi_3' = \frac{\pi_3}{\pi_4'} = \frac{E_{\text{пр}} x_o P}{\omega \mu H_{k1} U_k^2}; \quad \pi_3'' = \pi_3 \pi_5' = \frac{\omega \varepsilon E_{\text{пр}} P}{H_{k1} b_o U_k^2}.$$

С учетом π_1 и π_2 окончательно получим:

$$\pi_1' = \pi_3' \frac{\pi_1}{\pi_2} = \frac{k_I E_{\text{пр}} x_o P}{\omega \mu k_u H_{k1} U_k^2};$$

$$\pi_1'' = \pi_3'' \frac{\pi_1}{\pi_2} = \frac{\omega \varepsilon k_I E_{\text{пр}} P}{k_u H_{k1} b_o U_k^2}.$$
(3)

В электропередачах со сверхпроводниками второго рода, работающими при напряженности поля между первым и вторым

критическими полями ($H_{k_1} < H < H_{k_2}$), ток проникает во все сечение проводника, и важными величинами при выборе параметров линии являются критическая плотность тока j_k и толщина сверхпроводника n_{sp} . Поэтому эти величины возьмем в качестве определяющих вместо H_{k_1} . Остальные величины выберем те же, что и раньше.

Тогда первые два критерия останутся прежними:

$$\pi_1 = k_1; \quad \pi_2 = k_u.$$

Для нахождения остальных критериев составим степенную функцию в виде

$$\Phi = P^a U_k^b J_k^c n_{sp}^d E_{пр}^e \mu^f \epsilon^g \omega^p x_o^r b_o^k. \quad (4)$$

Ее размерность

$$\begin{aligned} [\Phi] &= [L^2 M T^{-3}]^a [L^2 M T^{-3} I^{-1}]^b [L^{-2} I]^c [L]^d \times \\ &\times [L M T^{-3} I^{-1}]^e [L M T^{-2} I^{-2}]^f [L^{-3} M^{-1} T^4 I^2]^g \times \\ &\times [T^{-1}]^p [L M T^{-3} I^{-2}]^r [L^{-3} M^{-1} T^3 I^2]^k = 1. \end{aligned}$$

Отсюда система из $q = 4$ уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 2a+2b-2c+d+e+f-3g+r-3k &= 0; \\ a+b+e+f-g+r-k &= 0; \\ -3a-3b-3e-2f+4g-p-3r+3k &= 0; \\ -b+c-e-2f+2g-2r+2k &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Решив ее относительно a, c, d, p , получим

$$a = -b - e - f + g - r + k;$$

$$c = b + e + 2f - 2g + 2r - 2k;$$

$$d = 2b + 3e + 5f - 3g + 5r - 3k;$$

$$p = f + g.$$

Подставляя (5) в (4), найдем

$$\phi = P^{-b-e-f+g-r+k} U_k j_k b_k^{b+e+2f-2g+2r-2k} x$$

$$x n_{\text{сп}}^{2b+3e+5f-3g+5r-3k} E_{\text{пр}}^e \mu^f \varepsilon^g \omega^{f+g} x_o^r b_o^k$$

или

$$\Phi = (P^{-1} U_k j_k n_{\text{сп}}^2)^b (P^{-1} j_k n_{\text{сп}}^3 E_{\text{пр}})^e (P^{-1} j_k n_{\text{сп}}^5 \mu \omega)^f x$$

$$x (P j_k^{-2} n_{\text{сп}}^{-3} \varepsilon \omega)^g (P^{-2} j_k^2 n_{\text{сп}}^5 x_o)^r (P j_k^{-2} n_{\text{сп}}^{-3} b_o)^k.$$

Отсюда критерии подобия

$$\pi_3 = \frac{U_k j_k n_{\text{сп}}^2}{P}; \quad \pi_4 = \frac{j_k n_{\text{сп}}^3 E_{\text{пр}}}{P}; \quad \pi_5 = \frac{j_k n_{\text{сп}}^5 \mu \omega}{P};$$

$$\pi_6 = \frac{P \varepsilon \omega}{j_k^2 n_{\text{сп}}^3}; \quad \pi_7 = \frac{j_k^2 n_{\text{сп}}^5 x_o}{P}; \quad \pi_8 = \frac{P b_o}{j_k^2 n_{\text{сп}}^3};$$

Преобразуем критерии π_3, \dots, π_8 :

$$\pi_5' = \frac{\pi_5}{\pi_7} = \frac{\omega \mu}{x_o}; \quad \pi_6' = \frac{\pi_6}{\pi_8} = \frac{\omega \varepsilon}{b_o}; \quad \pi_4' = \frac{E_{\text{пр}} n_{\text{сп}}}{U_k};$$

$$\pi_5'' = \frac{\pi_4'}{\pi_5'} = \frac{E_{\text{пр}} n_{\text{сп}} x_o}{\omega \mu U_k}; \quad \pi_6'' = \pi_4' \pi_6' = \frac{\omega \varepsilon E_{\text{пр}} n_{\text{сп}}}{U_k b_o}.$$

С учетом π_1 и π_2 получим

$$\pi_1' = \pi_5'' \frac{\pi_1}{\pi_2} = \frac{k_I E_{\text{пр}} n_{\text{сп}} x_o}{\omega \mu k_u U_k};$$

$$\pi_1'' = \pi_6'' \frac{\pi_1}{\pi_2} = \frac{\omega \varepsilon k_I E_{\text{пр}} n_{\text{сп}}}{k_u U_k b_o}.$$

(6)

Отсюда следует, что величины P и j_k оказались лишними.

Из критериев (3) следует, что для линий со сверхпроводниками, работающими при $N < N_{k1}$, реактивное сопротивление x_0 прямо пропорционально квадрату номинального напряжения линии и обратно пропорционально расчетной мощности в первой степени. Реактивная проводимость b_0 прямо пропорциональна мощности и обратно пропорциональна квадрату номинального напряжения.

Анализ критериев (6) показывает, что для линий со сверхпроводниками, работающими при $N_{k1} < N < N_{k2}$, зависимости x_0 и b_0 от расчетной мощности косвенные через коэффициент k_I и толщину сверхпроводника $n_{сп}$. Между x_0 и напряжением линии имеется прямая пропорциональность, а между b_0 и напряжением — обратная пропорциональность.

Л и т е р а т у р а

1. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. М., 1976. 2. Лебедев А.Н. Простейший формальный метод определения критериев подобия при анализе размерностей. — Изв. вузов СССР. Энергетика, 1977, №4. 3. Бережной А.В., Федин В.Т. Криогенные электропередачи. Минск, 1977.

УД К 321.311.1:321.315.05

А.В.Бережной, канд.техн.наук,
В.Г.Королюк

НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ТОКОПРОВОДОВ ИЗ ОПЛЕТОК С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ

Стабилизация — это система мероприятий, снижающих вероятность возникновения нормальной зоны или предотвращающих распространение ее по сверхпроводящему кабелю. Наиболее простым инженерным решением стабилизации является шунтирование сверхпроводника некоторым количеством нормального металла, который обладает хорошими электрической и тепловой проводимостями. Принцип стабилизации заключается в том, что при нарушении сверхпроводимости (локально или повсеместно) осуществляется перераспределение токов между сверхпроводником и шунтирующим металлом. В работах [1 и др.] рассматривались вопросы стабилизации сверхпроводящих магнитных

систем. В данной статье выводятся необходимые условия, которые должны быть выполнены при рассмотрении вопросов стабилизации кабеля из сверхпроводящих оплеток [2].

Отечественной промышленностью сверхпроводящие оплетки изготавливаются из проволочек, покрытых защитным или технологическим материалом. Причем в качестве защитного или технологического материала может быть использован любой металл.

Стабилизации сверхпроводящих оплеток можно добиться путем включения в конструкцию токопровода шунтирующего металла высокой проводимости. Для обеспечения перераспределения тока между сверхпроводником и шунтирующим металлом через технологическое покрытие необходимо, чтобы сопротивление сверхпроводника в нормальном состоянии R было больше сопротивления технологического покрытия R_c , т.е. выполнить условие

$$R_c > R \quad (1)$$

Если предположить, что сверхпроводник диаметром d и удельным сопротивлением в нормальном состоянии ρ_c покрыт технологическим металлом диаметром d_c и удельным сопротивлением ρ , то условие (1) запишется в следующем виде:

$$\frac{\rho_c}{\pi d_c^2} > \frac{\rho}{\pi (d^2 - d_c^2)} \quad (2)$$

Из условия (2) следует, что перераспределения тока между сверхпроводником и шунтирующим металлом можно добиться или увеличением диаметра d при заданных удельных сопротивлениях ρ_c и ρ , или уменьшением ρ при определенных значениях ρ_c и d .

Решая неравенство (2) относительно d , получим

$$d > d_c \sqrt{1+k}, \quad (3)$$

где $k = \rho / \rho_c$.

На рис. 1 построены области значений d / d_c в зависимости от k . Из рис. 1 видно, что диаметр технологического покрытия нельзя брать произвольно, поскольку существует область, в которой невозможно добиться перераспределения токов между сверхпроводником и шунтирующим металлом.

В случае, когда диаметр покрытия определяется технологией, необходимо условие

$$\rho < \rho_c \left(\frac{d^2}{d_c^2} - 1 \right). \quad (4)$$

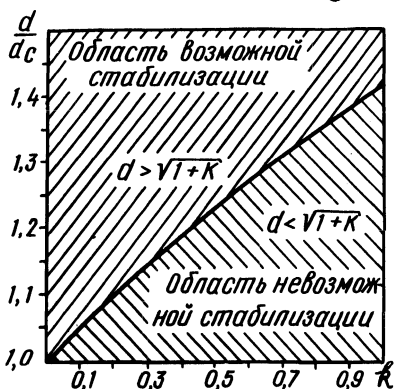


Рис. 1. Зависимость d/d_c от k .

Выражения (3) и (4) являются необходимыми, но не достаточными условиями для стабилизации сверхпроводника в аварийном режиме. Достаточным условием стабилизации является условие сохранения температуры токопровода при нарушении сверхпроводимости по каким-либо причинам.

Л и т е р а т у р а

1. Альтов В.А. и др. Стабилизация сверхпроводящих магнитных систем. М., 1975. 2. Боброва Г.И. и др. Экспериментальная установка для исследования теплообмена в пористом сверхпроводящем кабеле. - Изв. АН БССР. Серия физико-энергетических наук. Минск, 1976, № 2.

УДК 621.316

М.А.Короткевич, канд. техн. наук,
М.И.Травянский

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО ПРЕДПРИЯТИЯ С ПОМОЩЬЮ ФАКТОРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эффективность функционирования предприятия электрических сетей (ПЭС) определяется совокупностью технико-экономических показателей.

Важнейшим из названных показателей является стоимость распределения электроэнергии, значения которой зависят от конструктивных и режимных параметров электрической сети (стоимость сети K , стоимость потерь энергии $\Gamma_{\Delta\epsilon}$, расходы на ремонт сети Γ_p , расходы на эксплуатацию Γ_ϵ). Попытаемся отыскать эмпирическую зависимость стоимости распределения электроэнергии или приведенных затрат (3) от указанных факторов методом планирования эксперимента [1...3] и найти их оптимальные значения.

В этом случае находится не сама функция, а так называемая функция отклика, получающаяся путем разложения искомой функции в степенной ряд. При количестве факторов в опыте ($n = 4$) функция отклика имеет вид [1]

$$\begin{aligned}
 Z = & b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_1 x_2 + b_6 x_1 x_3 + \\
 & + b_7 x_1 x_4 + b_8 x_2 x_3 + b_9 x_2 x_4 + b_{10} x_3 x_4 + b_{11} x_1^2 + b_{12} x_2^2 + \\
 & + b_{13} x_3^2 + b_{14} x_4^2, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где b_0, \dots, b_{14} - коэффициенты, которые необходимо определить по результатам эксперимента; x_1, \dots, x_4 - факторы.

Матрица планирования ортогонального центрально-композиционного плана второго порядка имеет вид [3].

Пусть изменение факторов для одного ПЭС лежит в пределах:

	Минимум	Максимум
K , млн.руб.	1,7	5,1
Γ_p , млн.руб.	0,04	0,1
Γ_ϵ , млн.руб.	0,17	0,35
$\Gamma_{\Delta\epsilon}$, млн.руб.	0,1	0,24

Результаты эксперимента (Z_i , тыс. руб.)

514	922	574	982	694	1102	754	1162	полный факторный эксперимент
654	1060	714	1122	834	1242	894	1302	

288,5 856,4 56,6 141,4 "звездные точки"
 240,4 495 141,4 339,4

0 - центральная точка.

Искомые коэффициенты модели определяются по формулам [1-2]: величина "звездного" плеча (α) при $n = 4$ равна 1,414; общее число опытов $N_0 = 2^n + 2n + 1 = 2^4 + 2 \cdot 4 + 1 = 25$; число опытов на двух уровнях $N_1 = 2^n = 2^4 = 16$; сумма квадратов элементов столбца на двух уровнях $t = 2^n + 2\alpha^2 = 16 + 2(1,414)^2 = 20$; среднее значение квадратов элементов столбца $a \frac{t}{N_0} = 0,8$; среднее значение квадратов элементов столбца матрицы независимых регрессионных функций, преобразованной к ортогональному виду $t_1 = N_1(1 - 2a) + 2\alpha^2(\alpha^2 - 2a) + N_0 a^2 = 8$; сумма экспериментальных значений целевой функции, соответствующих опытам полного факторного эксперимента $S_1 = \sum_{i=1}^{16} 3_i = 14526$; сумма экспериментальных значений целевой функции, соответствующих матрице планирования

$$S_0 = S_1 + \sum_{i=17}^{25} 3_i = 14526 + 2559,1 = 17085,1;$$

$$S_2 = S_1 - aS_0 = 14526 - 0,8 \cdot 17085,1 = 857,9;$$

$$b_j = \frac{1}{t} \left[\sum_{i=1}^{16} 3_i X_{ij} + \alpha(3_{k+1} - 3_k) \right], j=1, \dots, 4; \quad (2)$$

$k=17, \dots, 24;$

$$b_{\nu} = \frac{1}{N_1} \sum_{\substack{i=1 \\ \theta \neq j}}^{16} X_{\theta} X_j 3_i; j, \theta=1, \dots, 4; \nu=5, \dots, 10; \quad (3)$$

$$b_{\lambda} = \frac{1}{t_1} \left[S_2 + \alpha^2(3_k + 3_{k+1}) \right], \lambda=11, \dots, 14; \quad (4)$$

$$b_0 = \frac{S_0}{N_0} - a \sum_{\lambda=11}^{14} b_{\lambda}. \quad (5)$$

Здесь X_{θ}, X_j - элемент, соответствующий подматрицы плана, равный +1 или -1.

После вычисления коэффициентов, уравнение (1) примет вид

$$\begin{aligned} Z = & -485,6 + 203,2X_1 + 30,1X_2 + 90,1X_3 + 69,9X_4 + \\ & + 0,125X_1X_2 + 0,125X_1X_3 - 0,125X_1X_4 - 0,125X_2X_3 + \\ & + 0,125X_2X_4 + 0,125X_3X_4 + 393,4X_1^2 + 156,6X_2^2 + 291,1X_3^2 + \\ & + 227,4X_4^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Проверка по критерию Фишера [1] ($F = 1,1 < F_{\text{табл}} = 2,6$) показала приемлемость модели (6).

Взяв частные производные $\frac{\partial Z}{\partial X_j}$ (6), приравняв их к нулю и решив полученную систему уравнений, можно определить оптимальные значения X_j . Для нашего примера $X_1 = -0,253$; $X_2 = -0,1$; $X_3 = -0,078$; $X_4 = -0,153$ и $K_{\text{опт}} = 2969,9$; $\Gamma_{\text{ропт}} = 66,9$; $\Gamma_{\text{эопт}} = 247,7$; $\Delta_{\text{эопт}} = 159,4$ тыс. руб.

Л и т е р а т у р а

1. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф. Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. М., 1975. 2. Гераскин О.Т. Оптимизация режимов энергетических систем методом планирования эксперимента. - Изв. вузов СССР. Энергетика, 1977, № 8. 3. Хрипко В.Л., Алехин А.Б. Расчет узлов коммутации преобразователей частоты методом планирования эксперимента. - Изв. вузов СССР. Энергетика, 1977, № 8.

УДК 621.3.016.351

В.А.Файбисович, канд.техн. наук

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ОБРАТНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Усложнение схем и режимов современных электроэнергетических систем, повышение требований к надежности электропитания потребителей создает значительные трудности при проведении экспериментальных исследований. В этих условиях

становится актуальной реализация оптимальных планов экспериментов с целью получения максимума информации об изучаемом процессе при наличии ограничений на время проведения эксперимента и допустимое изменение режима. Многие объекты электроэнергетики являются нелинейными по определяемым параметрам. Например, определение параметров асинхронного двигателя по результатам измерений, выполняемых в ряде нормальных установившихся режимов, приводит к поверхности отклика следующего вида:

$$\eta(\bar{x}, \bar{\theta}) = x_1^2 \left(\frac{1}{2\theta_1} + \frac{1}{\theta_2} \right) - \sqrt{\frac{x_1^4}{4\theta^2} - x_2^2}. \quad (1)$$

При экспериментальном определении предела передаваемой мощности по линии электропередачи поверхность отклика характеризуется выражением [1]

$$\eta(\bar{x}, \bar{\theta}) = \theta_1 x_1^2 - \sqrt{\theta_2^2 x_1^2 - (x_2 - x_1^2 \theta_3)^2}. \quad (2)$$

Одним из эффективных способов решения нелинейных обратных регрессионных задач является последовательное планирование [2]. При нелинейной параметризации может существовать область значений оцениваемых параметров, которой соответствует неизменный план эксперимента, оптимального в соответствии с выбранным критерием [3]. Основной задачей планирования, выполняемого до проведения эксперимента, является нахождение этой области. Если есть уверенность, что истинные значения оцениваемых параметров находятся внутри указанной области, то найденный план должен применяться при проведении натурального эксперимента. Для построения планов эксперимента, соответствующих различным значениям оцениваемых параметров, составлена и отлажена программа на языке "Алгол-60", реализующая последовательный метод планирования В.В.Федорова. Работа программы начинается с ввода данных "затравочного" эксперимента и начального приближения для оцениваемых параметров. Нахождение оценок для параметров на каждом шаге последовательного планирования осуществляется путем решения системы нелинейных нормальных уравнений. Кроме того, на каждом шаге работы программы производится выбор точки, в которой целесообразно выполнить следующее измерение. Процесс измерений моделируется путем добавления к величине поверхности отклика, вычисленной при точных зна-

чениях оцениваемых параметров, распределенной по нормальному закону ошибки. Критерием окончания итерационного процесса построения оптимального плана является близость значения нормированной дисперсии поверхности отклика к его теоретическому значению, равному числу оцениваемых параметров. С использованием данной программы производилось построение оптимальных планов и поиск областей значений оцениваемых параметров, в которых локально-оптимальные планы остаются неизменными, для моделей (1) и (2). На расчет 50 шагов планирования затрачивалось около 1 ч машинного времени ЦВМ БЭСМ-4, из которых 4 мин. занимала трансляция программы (при использовании транслятора ТА-1М). Оптимальные планы оказывались сосредоточенными в вершинах областей факторного пространства. При варьировании значений оцениваемых параметров в широком диапазоне оптимальные планы эксперимента не менялись. Это обстоятельство является весьма важным, так как позволяет для нелинейных по оцениваемым параметрам объектов произвести априорное планирование эксперимента и позволяет избежать непрерывного обращения к ЦВМ в ходе выполнения эксперимента.

Л и т е р а т у р а

1. Файбисович В.А. Определение предела передаваемой мощности электропередачи в условиях эксплуатации электрической системы. – Электричество, 1976, №4. 2. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. М., 1971. 3. Фомина Е.С., Фомин Г.А. Построение априорных планов эксперимента для регрессионных моделей, нелинейных по параметрам. – Тез. докл. У Всесоюзн. конф. по планированию и автоматизации эксперимента в научных исследованиях. Математическая теория эксперимента. М., 1976.

УДК 621.313.32:538.311

А.Г.Губанович

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ НА ВЕЛИЧИНУ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ В ЛОБОВОЙ ЧАСТИ ОБМОТКИ СТАТОРА МОЩНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Мощные отечественные и зарубежные турбогенераторы имеют в большинстве петлевую обмотку стержневого типа с эволь-

вентной лобовой частью. Лобовые стержни при этом находятся на очень близких расстояниях друг от друга. Поэтому при расчете электродинамических усилий (э.д.у.) в лобовой части обмотки турбогенераторов необходимо принимать в расчет размеры поперечного сечения проводников. По приближенным оценкам некоторых авторов [1] влияние размеров поперечного сечения сказывается в пределах 10% для радиальной составляющей и 5% для тангенциальной и аксиальной составляющей э.д.у.

При использовании ЭЦВМ для расчета э.д.у. появляется возможность более точного учета влияния размеров сечения. Известный классический способ учета влияния размеров сечения на э.д.у. по кривым для параллельных проводников в данном случае неприменим. Использование математического выражения для коэффициента формы при произвольном расположении проводников в виде пятикратного интеграла также затруднительно, поскольку приведет к построению очень сложного алгоритма расчета э.д.у. и потребует больших затрат машинного времени.

Наиболее приемлемым методом учета влияния размеров сечения проводников на э.д.у. при расчетах на ЭЦВМ представляется численный: дробление проводника на ряд элементарных, расчет их взаимодействия по методике [2] и суммирование по сечению стержня.

Для дробления сечения необходимо иметь координаты в пространстве граничных точек каждого участка, на которые дробится лобовая дуга. Чтобы их получить, удобно использовать аналитическое описание геометрии лобовой дуги, полученное в [3]. При этом дуга представляется в виде бесконечно тонкого стержня.

Координаты точек произвольного сечения стержня в цилиндрической системе координат определяются как функции расстояния до расчетной точки дуги

$$\left. \begin{aligned} r(s) &= l(s) \sin \alpha \mp \frac{h}{2} \cos \alpha; \quad z(s) = l(s) \cos \alpha \pm \frac{h}{2} \sin \alpha; \\ r(s) &= \frac{1}{\sin \alpha} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{\rho \sin t - (\rho t \pm \frac{d}{2}) \cos t}{\rho \cos t + (\rho t \pm \frac{d}{2}) \sin t} \right) - \right. \end{aligned} \right\} (1)$$

$$- \operatorname{arctg} \left(\frac{\sin t_0 - t_0 \cos t_0}{\cos t_0 + t_0 \sin t_0} \right); \quad (1)$$

$$t = \sqrt{t_0^2 + \frac{2s}{\rho}}; \quad l(s) = \rho \sqrt{1+t^2},$$

где α - угол наклона конуса лобовых частей; ρ - радиус образующего круга; t_0 и t - соответственно начальный и текущий параметр эвольвенты; s - расстояние до расчетного узла от начальной точки соответствующей t_0 ; d , h - ширина и высота сечения стержня.

Далее по известным выражениям производится преобразование координат точек сечения к декартовой системе.

Расчет координат центров элементарных сечений производится по выражению

$$\left. \begin{aligned} B_{ij,k} = & A_{1k} + (A_{4k} - A_{1k}) \frac{d}{2m} + (A_{4k} - A_{1k}) \frac{d}{m} \lambda_i + \\ & + \left[(A_{2k} + (A_{3k} - A_{2k}) \frac{d}{2m} + (A_{3k} - A_{2k}) \frac{d}{m} \lambda_i) - \right. \\ & - A_{1k} - (A_{4k} - A_{1k}) \frac{d}{2m} - (A_{4k} - A_{1k}) \frac{d}{m} \lambda_i \left. \right] \frac{h}{2n} + \\ & + \left[(A_{2k} + (A_{3k} - A_{2k}) \frac{d}{2m} + (A_{3k} - A_{2k}) \frac{d}{m} \lambda_i) - \right. \\ & - A_{1k} - (A_{4k} - A_{1k}) \frac{d}{2m} - (A_{4k} - A_{1k}) \lambda_i \frac{d}{m} \left. \right] \cdot \frac{h}{n} \lambda_j, \end{aligned} \right\} (2)$$

где m, n - число дроблений соответственно по ширине и высоте стержня; $A_{1k}, A_{2k}, A_{3k}, A_{4k}$ - координаты точек сечения в декартовой системе координат, $k = x, y, z$; $\lambda_i = 0, 1, 2, \dots, (m-1)$; $\lambda_j = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$.

Элементарные дробления заменяются бесконечно тонкими проводниками, расположенными в центрах полученных сечений, и производится расчет их взаимодействия с элементарными проводниками участка другого стержня. Полученные таким образом коэффициенты контура для расчета э.д.у., которые зависят только от взаимного положения в пространстве участков исследуемой лобовой дуги и остальных дуг обмотки, суммируются по сечению стержня.

Разработаны программы расчета на ЭЦВМ коэффициентов контура э.д.у. без учета влияния размеров поперечного сечения проводников и с учетом их влияния. Программы составлены на языке "Фортран".

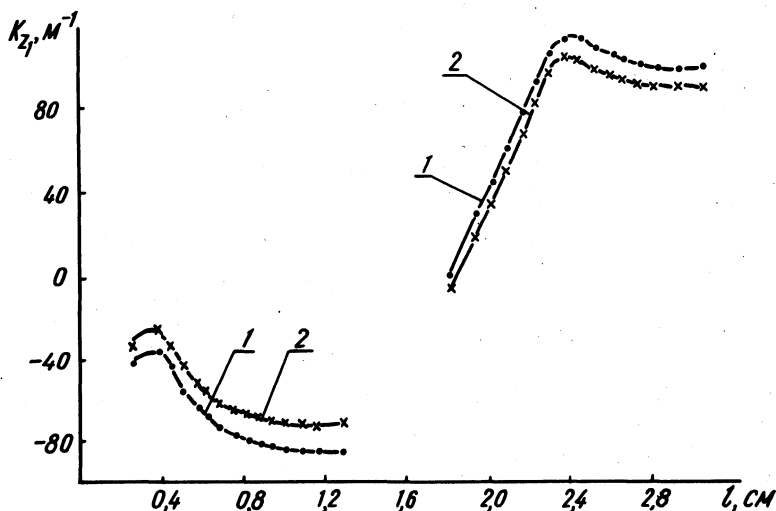


Рис. 1. Распределение удельных значений аксиальных составляющих коэффициентов контура вдоль лобовой дуги первого витка фазы А турбогенератора ТВВ-320-2 от проводников фазы А: 1 – без учета влияния размеров поперечного сечения проводников; 2 – с учетом влияния.

Рассчитывались удельные и суммарные составляющие коэффициентов контура э.д.у., обусловленные влиянием проводников отдельных фаз обмотки. На рис. 1 приведено распределение аксиальных составляющих коэффициентов контура вдоль первой лобовой дуги фазы А генератора ТВВ-320-2 от проводников фазы А.

Л и т е р а т у р а

1. Lawrenson P.J. Forces on turbogenerator end windings. - Proc. of the IEE. 1965. 112, №4.
2. Рудкий А.И., Стрелюк М.И., Губанович А.Г. Расчет электродинамических усилий в лобовых частях генераторов. - Изв. вузов СССР. Энергетика, 1976, № 6.
3. Цветков В.А. К расчету электродинамических сил в зоне лобовых частей в обмотке статора электрической машины. - Электричество, 1972, № 4.

В.Г.Пекелис, канд.техн.наук,
А.Е.Розенберг

ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД НАХОЖДЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА РАЗМЕЩЕНИЯ ШУНТОВЫХ КОНДЕНСАТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Известно, что одним из наиболее эффективных мероприятий, направленных на снижение потерь электроэнергии в электрических сетях и повышение их пропускной способности является компенсация реактивных нагрузок с помощью батарей статических конденсаторов (шунтовых конденсаторных батарей - ШКБ).

Для эффективного использования последних необходимо решить задачу оптимального размещения ШКБ и выбора их рабочих параметров, т.е. решить так называемую задачу рациональной компенсации.

Данная оптимизационная задача имеет нелинейную неоднородную (с разрывами первого рода) целевую функцию, что обусловлено наличием в последней постоянных (фиксированных) затрат на установку ШКБ, независимых от их мощности.

Выделение указанных затрат позволяет оптимизировать общее количество батарей, что особенно необходимо при рассмотрении распределительных сетей 6-10-35 кВ, где величина этих затрат сопоставима со стоимостью самих конденсаторов. Наличие в целевой функции фиксированных затрат обуславливает многоэкстремальность целевой функции, что резко усложняет процесс поиска ее глобального экстремума.

В настоящее время предложено несколько приближенных методов [1...3] решения поставленной задачи, основанных на поочередном исключении или добавлении (наращивании) батарей в порядке убывания их долевого эффекта, который определяется для некоторого заранее заданного состава батарей. Указанные методы не гарантируют нахождения оптимального решения, поскольку они не учитывают динамику изменения долевого эффекта в процессе оптимизации при изменении состава батарей.

Авторами предлагается инженерная методика решения поставленной задачи, в которой устранены указанные недостатки существующих методов за счет учета динамики изменения долевого эффекта при изменении состава батарей.

Предлагаемая методика базируется на применении квадратичной целевой функции, выражающей суммарные приведенные

затраты на покрытие потерь от передачи реактивных нагрузок с учетом установки шунтовых конденсаторных батарей.

Процесс оптимизации целевой функции выполняется по специальному алгоритму в несколько последовательных этапов.

1. Для всех i -х узлов электрической сети ($i = 2, \dots, m$), где по техническим условиям возможна установка ШКБ, находятся оптимальные значения мощностей батарей в области непрерывного изменения целевой функции, что сводится к решению системы линейных уравнений в частных производных [4].

В результате решения указанной системы уравнений могут быть получены отрицательные значения искомым мощностей ШКБ, что противоречит физическому смыслу задачи. Характер целевой функции позволяет учитывать данное ограничение путем приравнивания нулю всех мощностей ШКБ, принявших отрицательное значение, после чего находится оптимальное решение задачи пониженной размерности.

Данная оптимизационная процедура завершается расчетом годового экономического эффекта от установки конденсаторных батарей, мощности которых Q_{ki}^n ($i = 1, \dots, n$) приняли положительные значения, по формуле

$$\Xi_i^{(n)} = Q_{ki}^{(n)} B_i - p A_i, \quad (1)$$

где B_i - свободный член i -го уравнения системы линейных уравнений, в результате решения которой найдена величина $Q_{ki}^{(n)}$; p - коэффициент общих ежегодных отчислений от капитальных затрат на установку ШКБ; A_i - постоянная составляющая капитальных затрат на i -ую ШКБ.

Заметим, что при расчете эффекта по формуле (1) обеспечивается одинаковое удельное снижение потерь мощности в общих участках распределительной линии, к которой подключено несколько батарей в расчете на единицу генерируемой мощности любой из них.

2. Рассчитывается годовой экономический эффект от индивидуальной установки шунтовых конденсаторных батарей $\Xi_i^{(1)}$ (в предположении, что батарея устанавливается только в рассматриваемом узле) для всех узлов сети $i \in n$.

При этом искомые величины определяются по формуле

$$\Xi_i^{(1)} = \frac{B_i^2}{R_{ii}} - p A_i, \quad (2)$$

где R_{ii} - собственное сопротивление i -го узла сети относительно балансирующего узла.

3. Находится ШКБ, обеспечивающая наибольший годовой экономический эффект, для которой выполняется следующее условие:

$$\mathfrak{E}_j^{(1)} = \max_{i \in n} \mathfrak{E}_i^{(1)} \quad (3)$$

4. Для всех i -х узлов сети ($i \in n$) рассчитывается годовой экономический эффект от установки батарей при попарной (совместной) их работе с j - ШКБ, найденной по п. 3. С этой целью первоначально рассчитываются новые оптимальные мощности всех конденсаторных батарей по формуле

$$Q_{ki}^{(2)} = \frac{B_i R_{jj} - B_j R_{ij}}{R_{ii} R_{jj} - R_{ij}^2}, \text{ где } i \in n. \quad (4)$$

Далее по формуле (1) определяются искомые величины долевого эффекта $\mathfrak{E}_i^{(2)}$.

Таким образом находим три точки искомой зависимости долевого эффекта, обеспечиваемого каждой батареей от их общего числа.

5. Рассчитываются коэффициенты указанной аппроксимирующей зависимости, имеющей следующий вид:

$$\mathfrak{E}_i(\xi) = \mathfrak{E}_i^{(n)} + \frac{\mathfrak{E}_i^{(1)} - \mathfrak{E}_i^{(n)}}{2} \left[1 + \left(\frac{n-\xi}{n-1} \right)^{\lambda_1} - \left(\frac{\xi-1}{n-1} \right)^{\lambda_2} \right], \quad (5)$$

где ξ - текущий параметр ($\xi = 1, \dots, n$); λ_1, λ_2 - искомые коэффициенты, определяемые в свою очередь по формулам

$$\lambda_1 = \frac{\ln \frac{\mathfrak{E}_i^{(2)} - \mathfrak{E}_i^{(n)}}{\mathfrak{E}_i^{(1)} - \mathfrak{E}_i^{(n)}}}{\ln \frac{n-2}{n-1}}; \quad (6)$$

$$\lambda_2 = \frac{\ln \frac{\varepsilon_i^{(1)} - \varepsilon_i^{(2)}}{\varepsilon_i^{(1)} - \varepsilon_i^{(n)}}}{\ln \frac{1}{n-1}}. \quad (7)$$

6. Строится зависимость суммарного эффекта от установки ШКБ от количества и состава батарей для чего используются результаты расчетов, найденных по п. 5.

7. По кривой изменения суммарного эффекта от установки ШКБ определяется точка экстремума, после чего выполняется процедура корректировки состава и количества батарей. В результате находится оптимальный вариант размещения ШКБ в рассматриваемой сети.

Л и т е р а т у р а

1. Ковалев И.Н., Татевосян Г.М. Один из методов компенсации реактивных нагрузок в электрических сетях. - Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1964, № 5. 2. Пекелис В.Г., Розенберг А.Е. О размещении шунтовых конденсаторных батарей в высоковольтных распределительных сетях энергосистем. - "Электричество", 1976, № 12. 3. Зорин В.В., Экель П.Я. Определение мест установки и мощности конденсаторных батарей в распределительных электрических сетях. - В сб.: Методы и устройства для снижения потерь электроэнергии в электрических сетях. Киев, 1977. 4. Пекелис В.Г., Розенберг А.Е. Оптимизация размещения шунтовых конденсаторных батарей на распределительных системных подстанциях. - В сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики вып. 3. Минск, 1976.

УДК 621.311.017.2/39:681.3

И.З.Шапиро

ПЛАНИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ И МЕРОПРИЯТИЯ ПО ИХ СНИЖЕНИЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Планирование потерь электроэнергии на самом верхнем иерархическом уровне (Минэнерго СССР) и более низких уровнях сводится к задаче оптимального распределения плана по-

терь $\Delta A_{\text{пл}}$ между m энергосистемами республиканских министерств (главков), энергообъединениями и энергосистемами. Поскольку для достижения плановой величины потерь $\Delta A_{\text{пл}}$ в энергосистемах необходимо проводить целевые мероприятия по их снижению и затрачивать на это определенные средства, то в качестве критерия оптимальности используется минимум приведенных затрат на эти мероприятия

$$Z = \min_{\alpha_{ij}} p_{\Sigma} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} a_{ij} \alpha_{ij}^2 \Delta A_{rij} - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_{ij} \Delta A_{rij} \beta_{ij}, \quad (1)$$

где i, j - текущие индексы соответственно энергосистемы и ступени номинального напряжения (общее число ступеней n); α - относительная величина снижения потерь, $\alpha = \delta A / \Delta A_p$; δA - величина потерь снижения за счет целевых мероприятий; ΔA_p - расчетная величина потерь (без учета выполнения целевых мероприятий); a - статистический коэффициент; β - стоимость потерь энергии; p_{Σ} - суммарный коэффициент отчислений от капиталовложений.

Минимизация выражения (1) должна осуществляться в рамках балансового ограничения

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (1 - \alpha_{ij}) \Delta A_{rij} = \Delta A_{\text{пл}}. \quad (2)$$

В результате решения задачи (1), (2) определяются искомые величины α_{ij} , с помощью которых рассчитываются плановая величина снижения потерь, требующиеся для этого капиталовложения и план потерь по каждой ступени номинального напряжения и в целом по энергосистеме.

Полученная экономико-математическая модель (1), (2) позволяет решить еще одну важную задачу: определить оптимальную величину потерь ΔA^* в целом по Минэнерго. Знание этой величины играет исключительно принципиальную роль при планировании потерь.

Для любой энергосистемы существует оптимальный уровень потерь, когда целевые мероприятия по их снижению становятся экономически невыгодными. Очевидно, что плановая величина потерь должна быть не ниже этого уровня. В противном случае для выполнения плана потребуются экономически неоправданные капиталовложения для снижения потерь. Для нахождения указанного оптимального уровня потерь \downarrow раз решается задача (1) при различной величине $\Delta A_{\text{пл}}$. В результате строится за-

зависимость $Z = f(\Delta A_{пл})$, минимум которой и соответствует искомой точке глобального оптимума $\Delta A_{пл}^*$.

В дальнейшем рассмотренная задача решается для более низких уровней (районные энергетические управления, сетевые предприятия).

УДК 330.115

Е.В.Калентионок

ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗГРУЗОЧНОЙ АВТОМАТИКИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Выбор разгрузочной автоматики в энергосистеме как наиболее эффективного технико-экономического мероприятия по повышению надежности энергоснабжения ответственных потребителей в аварийных режимах можно проводить по минимуму приведенных затрат (З) с учетом требуемых на его осуществление капитальных вложений (К), ежегодных эксплуатационных затрат (Γ) и имеющегося при этом народнохозяйственного ущерба (Y) [1]. Одной из причин, сдерживающих применение такого критерия оптимальности, является отсутствие уверенности в возможности использования ущерба в выражении приведенных затрат из-за его вероятностного характера. Поэтому в технико-экономических расчетах Y учитывают его математическим ожиданием (м.о.) $M(Y)$ и, следовательно, оптимальный вариант определяют по минимуму м.о. приведенных затрат $M(Z)$.

Однако вариация величины Y от своего м.о. может привести к некупаемости дополнительных капитальных ΔK и эксплуатационных затрат $\Delta \Gamma_{э}$ энергосистемы и потребителя, направленных на уменьшение $M(Z)$. Поэтому условие $M(Z) \rightarrow \min$ при вероятностной величине ущерба является недостаточным для выбора варианта с большими K и Γ , но меньшими $M(Z)$. Учитывая, что величины K и Γ практически можно определить с большой степенью точности, то, используя [2], получим, что такой вариант будет предпочтительнее при выполнении условия

$$\frac{M(\Delta Y)}{P_H \Delta K + \Delta \Gamma_{э}} - 1 > R, \quad (1)$$

где R - вероятность (риск) неравенства м.о. приведенных затрат; $M(\Delta Y)$ - разность м.о. ущербов сравниваемых вариантов.

При $R \leq 0,05$ сравниваемые технические мероприятия следует считать экономически равноценными.

Как показывает анализ, объективность выводов о целесообразности использования разгрузочной автоматики в большой степени определяется достоверностью расчетов отдельных составляющих народнохозяйственного ущерба.

1. Ущерб потребителей от нарушения надежности элемента и воздействия разгрузочной автоматики энергосистемы; м.о. его можно определить из выражения

$$M(y_n) = \lambda \left[\sum_{i=1}^m M(y_{vi}) M(P_i) + \sum_{i=1}^n M(y_{pi}) M(P_i) M(t_{pi}) + \sum_{i=n+1} M(y_{di}) M(P_i) M(t_{pi}) \right], \quad (2)$$

где $M(y_{vi})$ - м.о. удельного ущерба i -го потребителя от фактора внезапности нарушения надежности электроснабжения; $M(y_{pi})$ - м.о. удельного ущерба i -го потребителя, отключенного устройствами разгрузки энергосистемы; $M(y_{di})$ - м.о. удельного ущерба i -го потребителя, возникающего дополнительно от момента нарушения до момента восстановления энергоснабжения потребителей; $M(P_i)$ - м.о. нагрузки i -го потребителя; $M(t_{pi})$ - м.о. условного времени простоя i -го потребителя; λ - средняя интенсивность отказа элемента энергосистемы в год; m - количество всех потребителей рассматриваемого района; n - м.о. количества потребителей, отключаемых устройствами разгрузки.

2. Ущерб потребителей от ненадежности устройств разгрузки; м.о. ущерба от ложных срабатываний устройств можно рассчитать по формуле

$$M(y_{лр}) = \sum_{i=1}^k \left[(M(y_{vi}) + M(y_{pi}) M(t_{pi})) M(P_i) \lambda_{ли} \right], \quad (3)$$

где $\lambda_{ли}$ - м.о. числа ложных срабатываний устройства разгрузки i -го потребителя; k - количество устройств разгрузки; $M(t_{pi})$ - определяется временем оперативного включения потребителя при ложном отключении и восстановлением технологического процесса i -го потребителя.

3. Ущерб потребителей и энергосистемы от аварийного снижения напряжения и частоты.

4. Ущерб энергосистемы в аварийном режиме, вызывающего увеличение стоимости производства и непроизводительных потерь электрической энергии, повреждение и дополнительный износ оборудования, привлечение дополнительного количества обслуживающего персонала энергосистемы.

Л и т е р а т у р а

1. Иофьев Б.И. Автоматическое аварийное управление мощностью энергосистем. М., 1974. 2. М. де Гроот. Оптимальные статистические решения. М., 1974.

УДК 621.311.1.017

Л.В.Ничипорович, канд.техн.наук,
Л.П.Филианович

ФАКТОРНО-КЛАСТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Объективное определение величины потерь энергии в электрических сетях представляет собой сложную задачу вследствие необходимости выполнения большого количества расчетов и из-за отсутствия достоверной информации.

В этой связи актуальным является разработка методов, позволяющих снизить трудоемкость расчетов и ориентированных на использование фактически имеющейся исходной информации. Одним из таких подходов может быть использование регрессионных моделей, где в качестве параметров используются некоторые режимные и конструктивные параметры электрической сети. При этом весьма перспективным является применение уравнений регрессии, построенных не на основе непосредственно наблюдаемых параметров, а на основе так называемых главных факторов, которые в отличие от первых не коррелированы между собой и число их меньше числа непосредственно наблюдаемых параметров [1].

Регрессионная модель такого характера имеет вид

$$\Delta \mathcal{E} = C U,$$

где $\Delta \mathcal{E}$ – потери энергии в распределительной сети; C – матрица коэффициентов регрессионной модели; U – вектор–столбец главных факторов, определяемых в соответствии с методами факторного анализа [2].

При таком подходе не исключена погрешность в определении потерь энергии вследствие значительной дисперсии набора наблюдаемых параметров. Поэтому наряду с факторным анализом представляет интерес использование метода кластерного анализа, позволяющего разбить весь массив на кластеры (классы). Классификация считается выполненной успешно, если каждый кластер объединяет в себя объекты, более близкие в определенном смысле друг другу, чем объекты разных кластеров [3]. Поэтому факторное уравнение регрессии, построенное для каждого кластера, дает более точную оценку потерь энергии, чем уравнение, построенное для выборочной совокупности. Модель регрессии имеет вид

$$\Delta \mathcal{E}_i = f_i(Y), \quad i = 1, 2, \dots, k,$$

где k – число кластеров.

Для построения такой дискретно-непрерывной модели необходимо применение обоснованного способа классификации объектов.

Для того чтобы произвести группировку, необходимо количественно определить понятия сходства и разнооднородности объектов.

Применительно к данной задаче целесообразно осуществлять классификацию с использованием в качестве меры близости (расстояния) между объектами евклидова расстояния, определяемого по формуле [3]:

$$d(x_i; x_j) = \left[\sum_{p=1}^w (x_{pi} - x_{pj})^2 \right]^{1/2},$$

где w – количество параметров, характеризующих важный объект.

Здесь же решается вопрос о представлении исходных данных в некотором стандартном виде, общем для различных параметров. С этой целью параметры приводят к нормированной форме, что позволяет их количественно сравнивать друг с другом, несмотря на их возможную физическую разнооднородность. Нормирование производится следующим образом [3]:

$$Z_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j},$$

где x_{ij} – значение j -го признака для i -го объекта; \bar{x}_j – среднее арифметическое j -го признака; s_j – среднее квадратическое отклонение j -го признака.

Следует отметить, что кластеризация может осуществляться как по непосредственно наблюдаемым параметрам, так и по главным факторам. Применение факторно-кластерной модели для расчета потерь энергии, а особенно для прогнозирования их является более предпочтительной в силу преимуществ метода факторного анализа.

Выделение большого числа кластеров, естественно, увеличивает точность факторно-кластерной регрессионной модели, но при этом возрастает объем вычислений. Поэтому число кластеров должно соответствовать некоторому критерию оптимальности, выражающему уровни желательности различных группировок.

Таким критерием в данном случае является требуемая величина точности при определении потерь энергии в сетях.

Л и т е р а т у р а

1. Ничипорович Л.В., Филянович, Л.П. Применение факторно-регрессионного метода для определения потерь энергии в электрической сети. – В сб.: Компенсация реактивных нагрузок и снижение потерь электрической энергии в сетях промышленных предприятий. М., 1977.
2. Харман Г. Современный факторный анализ. М., 1972.
3. Дюран Б., Оделл П. Кластерный анализ. М., 1977.

УДК 621.315.017

Н.М.Сыч, канд.техн.наук,
С.П.Широчин

ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ СЕТИ ПО ПОТЕРЯМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Потери энергии в электрических сетях складываются из потерь холостого хода в проводимостях и нагрузочных потерь в сопротивлениях элементов сети. Основную трудность представляет расчет нагрузочных потерь. Для их определения известны три принципиальных подхода [1].

Первый из них основан на выявлении эквивалентной по потерям электроэнергии среднеквадратичной мощности $S_{ск}$ в интервале времени T , при которой выполняется условие

$$\int_0^T S_t^2 dt = S_{ск}^2 T. \quad (1)$$

Во втором случае протекающая по линии мощность S_t в промежутке расчетного периода T принимается неизменной и равной максимальной $S_{\text{макс}}$. При этом искомой величиной является время максимальных потерь τ , в течение которого выполняется условие

$$\int_0^T S_t^2 dt = S_{\text{макс}}^2 \cdot \tau. \quad (2)$$

Значения $S_{\text{СК}}$ и τ обычно определяются на основе обобщенных статистических характеристик. Известна теория получения данных величин в радиальных электрических сетях [2]. В замкнутых сетях использование показателей $S_{\text{СК}}$ и τ встречает известные затруднения, так как в качестве исходных здесь задаются лишь графики нагрузки в узлах электропотребления, а потоки мощности на отдельных участках сети нам неизвестны. Поэтому в замкнутых сетях предпочтительнее пользоваться методом графического интегрирования. Сущность данного метода заключается в том, что графики нагрузки в узлах сети в интервале расчетного периода разбиваются на ξ равных промежутков времени Δt , в пределах которых нагрузка энергосистемы принимается неизменной. По нагрузкам каждой ступени графиков выполняется электрический расчет сети и определяются соответствующие им потери мощности ΔP_j . Потери энергии за расчетный период T

$$\Delta \mathcal{E}(t) = \Delta t \sum_{i=1}^{\xi} \Delta P_j, \quad (3)$$

где $i = 1, 2, \dots, \xi$ - порядковый номер ступени графика нагрузки в промежутке времени T .

В таком виде метод графического интегрирования трудоемок. На практике рассматривают не все ступени годового графика, а лишь некоторые из них, соответствующие характерным режимным суткам (зимним, летним, осенним, весенним, рабочим, выходным). Потери энергии, найденные на характерные сутки, принимаются неизменными на протяжении принятой длительности этих суток в пределах расчетного периода.

Введем следующие обозначения: $\nu = 1, 2, \dots, \omega$ - порядковый номер характерных суток в пределах времени T ; $i = 1, 2, \dots, n$ - порядковый номер суток в пределах длительности ν -х характерных суток; $j = 1, 2, \dots, m$ - порядковый номер ступени

i -го суточного графика нагрузки; t_{ij} - продолжительность j -й ступени i -го суточного графика нагрузок; S_{ij} - нагрузка j -й ступени i -го суточного графика нагрузок.

С учетом принятых допущений потери энергии, соответствующие нагрузкам ν -х характерных суток,

$$\Delta \mathcal{E}_{\nu}^i = n_{\nu} \sum_{j=1}^m S_{ij}^2 t_{ij} \quad (4)$$

Однако значение (4) не будет равно фактической величине

$$\Delta \mathcal{E}_{\nu} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_{ij}^2 t_{ij} \quad (5)$$

из-за имеющей место неравномерности электропотребления за каждые i_{ν} сутки.

Для выполнения условия эквивалентности выражений (4) и (5) введем понятие коэффициента эквивалентности k_{ν} , т.е.

$$k_{\nu} n_{\nu} \sum_{j=1}^m S_{ij}^2 t_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_{ij}^2 t_{ij} \quad (6)$$

откуда

$$k_{\nu} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_{ij}^2 t_{ij}}{n_{\nu} \sum_{j=1}^m S_{ij}^2 t_{ij}} \quad (7)$$

При известных значениях k_{ν} для каждого ν -х характерных суток потери электроэнергии за время T

$$\Delta \mathcal{E}(t) = k_{\nu} \sum_{\nu=1}^{\omega} k_{\nu} n_{\nu} \sum_{j=1}^m \Delta P_{ij} \quad (8)$$

где ΔP_{ij} - потери мощности в схеме сети, соответствующие нагрузкам j -й ступени ν -х характерных суток; k_{ν} - коэффициент, учитывающий вынужденные режимы работы сети.

Для определения коэффициентов k_{γ} для каждой γ характерных суток по (7) необходимо располагать суточными графиками нагрузки за период T . Исследования авторов показали, что в основных электрических сетях для этой цели допустимо рассматривать не все суточные графики в пределах времени T_{γ} , а лишь наиболее характерные из них в каждом месяце (рабочие, выходные, предвыходные и т.п.), и вычисления вести не по графикам узлов нагрузки, а суммарному графику нагрузки энергосистемы. В связи с отсутствием в некоторых энергосистемах информации о графиках полной мощности допустимо также принять в формуле (7) вместо полной мощности лишь ее активную составляющую.

Таким образом, введение коэффициента k_{γ} существенно упрощает и уточняет метод графического интегрирования и придает ему практическую направленность и конкурентноспособность по сравнению с другими методами. К тому же методы среднеквадратичного тока и времени потерь не пригодны для их использования в замкнутых сетях.

Л и т е р а т у р а

1. Электрические системы. Под ред. В.А.Веникова. Т. II. М., 1971. 2. Пospelов Г.Е., Сыч Н.М. Учет и оценка потерь мощности и энергии в электрических сетях энергосистем. Минск, 1976.

УДК 621.311

М.М.Норейко

ПЕРЕРАСХОД ТОПЛИВА И СНИЖЕНИЕ МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ ПРИ ВЫВОДЕ АГРЕГАТА В РЕМОНТ

При годовом планировании капитальных ремонтов основного оборудования необходимо знать величины перерасходов топлива и снижений мощности в гидротепловой энергосистеме в зависимости от времени выводов агрегатов в ремонт. Для этого расчетный год разбивается на 12 месячных интервалов. Для каждого месяца задаются прогнозируемые графики электрических и тепловых нагрузок, прогнозируемые величины напоров воды и сработок водохранилищ для ГЭС с регулируемым стоком и величины приточности для ГЭС с нерегулируемым стоком. Ремонтная ситуация в энергосистеме моделируется увели-

чением электрических нагрузок на некоторую фиктивную величину, определяемую размещением суммарной мощности ремонтируемых агрегатов по критерию минимизации неравномерности абсолютного резерва мощности энергосистемы в пределах допустимых величин снижений мощности энергосистемы в результате ремонтов.

Оптимизация распределения тепловых и электрических нагрузок производится для концентрированной энергосистемы, но с учетом прогнозируемых среднемесячных величин относительных приростов потерь в сети на шинах станций. Для каждой станции сначала строятся характеристики расхода топлива в зависимости от выработанной электрической мощности при фиксированных величинах тепловых отборов, которые затем используются при распределении электрических нагрузок в энергосистеме. Выбор состава работающих агрегатов на станциях приближенно производится включением нулевой точки в состав расходных характеристик агрегатов. Для ГЭС итерационным методом определяются величины топливных эквивалентов расхода воды.

Распределение нагрузок между агрегатами станции со сложной тепловой схемой производится методом линейного программирования. При этом нелинейные расходные характеристики котлов и блоков аппроксимируются выпуклыми кусочно-линейными функциями. Для цилиндров турбин задаются линейные характеристики выработки электроэнергии в зависимости от тепла на выходе, а также ограничения по их максимальным и минимальным пропускным способностям. Задаются ограничения по максимальным мощностям турбин и по пропускным способностям РОУ и пиковых бойлеров. Решением задачи определяется первая точка расходной характеристики станции. Для построения каждой последующей точки используется предыдущий оптимальный базис, что на порядок сокращает время счета. Расходные характеристики блочных станций и ГЭС строятся более быстрым методом равенства относительных приростов по выпуклым оболочкам расходных характеристик блоков и гидротурбин. Аналогично, как для полного состава агрегатов, строятся расходные характеристики станций при отключенном агрегате из списка ремонтов. Для каждого часа графика электрических нагрузок определяется перерасход топлива в энергосистеме от отключения агрегата на основании анализа загрузки в энергосистеме станции с полным составом агрегатов и с отключенным рассматриваемым агрегатом. Однако для ГЭС каждому

составу ее агрегатов соответствуют свои величины топливных эквивалентов расхода воды и разность этих величин. характеризующая перерасход топлива в энергосистеме, может быть соизмерима с погрешностью их определения. Поэтому для гидротурбин перерасходы топлива приблизительно определяются по величине недовыработки на ГЭС мощности в результате ремонтов при средней нагрузке энергосистемы. В этом случае величины топливных эквивалентов расхода воды определять не нужно, так как нагрузка энергосистемы постоянна. Расчеты показали, что для агрегатов месячные величины перерасходов топлива могут различаться между собой на 10-20 тыс. т. у. т./мес. (блоки 300 МВт, турбины ПТ-60 и Т-100, котлы на станциях при малом резерве тепловой мощности, гидротурбины) или могут быть практически одинаковыми (неэкономичные конденсационные турбины, котлы на станциях с большим резервом тепловой мощности). Снижения мощности в энергосистеме определяются как разность между мощностями станций при полном составе оборудования и при отключенных рассматриваемых агрегатах. Для котлов и турбин с регулируемым отбором пара эти величины, как правило, меняются с изменением тепловых нагрузок станций.

Описанная методика реализована на алгоритмическом языке ПЛ-1. При 100 ремонтах время счета на ЕС-1022 составляет 3-4 ч. Результаты расчетов - величины месячных перерасходов топлива и снижений мощности в энергосистеме от отключений агрегатов выдаются в табличной форме на печать и предназначены для использования диспетчерской службой и службой ремонтов тепломеханического оборудования энергосистемы для обоснования минимальных и максимальных сроков выводов агрегатов в ремонт, модернизаций и реконструкций.

УДК 621.316.37

И.И.Сергей

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ СТАТИКИ ГИБКИХ ШИН РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С УЧЕТОМ ГИРЛЯНД ИЗОЛЯТОРОВ

Динамика гибких шин распределительных устройств (РУ) при к.з. описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных, численное решение которых сводится к решению нелинейных разностных уравнений [1].

В [2] указывается, что погрешность в решении разностных уравнений и сходимость к точному решению дифференциальных уравнений зависят от ошибки в задании начальных условий. Поэтому возникает необходимость в разработке более точного метода расчета статики гибких шин РУ с учетом гирлянд изоляторов, позволяющего найти указанные начальные условия [3].

В статье предлагается метод расчета гибких шин РУ с учетом гирлянд изоляторов, основанный на аналитическом решении дифференциальных уравнений гибких шин РУ, представленных абсолютно гибкой нерастяжимой нитью.

Известно [4], что наиболее удобным методом пространственного решения гибких нитей является векторный метод расчета, охватывающий общее решение всех задач. В [4] получено аналитическое решение дифференциальных уравнений в векторном виде, описывающее статику в пространстве абсолютно гибкой нерастяжимой нити

$$\left. \begin{aligned} \bar{R} &= \bar{a}_1 + \frac{1}{P} \left(\bar{a}_0 - \frac{\bar{a}_0 \bar{P}}{P^2} \bar{P} \right) \operatorname{Arsh} \frac{|\bar{P}|^2 S - \bar{a}_0 \bar{P}}{\sqrt{\bar{a}_0^2 \bar{P}^2 - (\bar{a}_0 \bar{P})^2}} - \\ &- \frac{\bar{P}^2}{P^2} \left| \bar{a}_0 - \bar{P} S \right| ; \\ \bar{T} &= \bar{a}_0 - \bar{P} S, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где \bar{a}_0, \bar{a}_1 - постоянные векторы интегрирования; S - текущая координат по нити; T, \bar{T} - модуль и вектор тяжения вдоль нити; P, \bar{P} - модуль и вектор результирующего усилия на единицу длины нити.

Для получения единообразной математической модели системы "гирлянды изоляторов - провода шин" воспользуемся представлением гирлянды изоляторов абсолютно гибкой нерастяжимой нитью. Получим, таким образом, кусочно-однородную нить, состоящую из трех однородных участков разной интенсивности распределенной нагрузки.

Кусочно-однородная гибкая нить (рис. 1), состоящая из трех участков, описывается в общем виде следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{R}_i &= \bar{a}_{1i} + \frac{1}{P_i} (\bar{a}_{oi} - \frac{\bar{a}_{oi} \bar{P}_i}{P_i^2} \bar{P}_i) \operatorname{Arsh} x \\
 x &= \frac{|\bar{P}_i|^2 S_i - (\bar{a}_{oi} \bar{P}_i)}{\sqrt{\bar{a}_{oi}^2 \bar{P}_i^2 - (\bar{a}_{oi} \bar{P}_i)^2}} - \frac{\bar{P}_i}{P_i^2} |\bar{a}_{oi} - \bar{P}_i S_i|; \\
 \bar{T}_i &= \bar{a}_{oi} - \bar{P}_i S_i; \quad i = I, II, III.
 \end{aligned} \right\} (2)$$

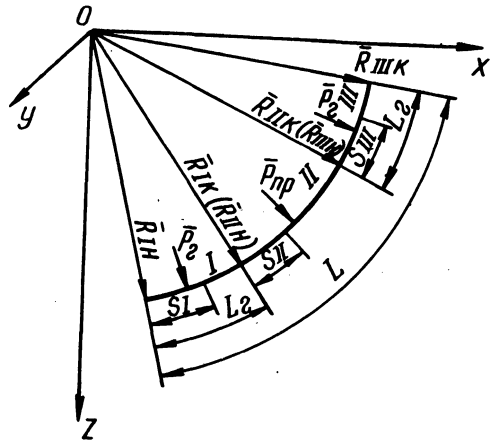


Рис. 1. Гибкие шины РУ с гирляндами изоляторов: L_i — длина гирлянды изоляторов; L — общая длина шин с гирляндами; \bar{P}_I и $\bar{P}_{пр}$ — векторы результирующих усилий соответственно на единицу длины гирлянды изоляторов и провода.

Текущие координаты по участкам кусочно-однородной нити изменяются в следующих пределах:

$$\left. \begin{aligned}
 0 \leq S_I \leq L_r; \\
 0 \leq S_{II} \leq (L - 2L_r); \\
 0 \leq S_{III} \leq L_r,
 \end{aligned} \right\} (3)$$

Для того чтобы решить систему уравнений (2), необходимо определить постоянные векторы интегрирования \bar{a}_{oi} и \bar{a}_{1i} , где $i = I, II, III$.

Будем считать известными граничные условия и длину участков гибкой системы. Это позволяет записать для граничных точек кусочно-однородной нити

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{R}_{iH} &= \bar{a}_{1i} + \frac{1}{P_i} \left(\bar{a}_{oi} - \frac{\bar{a}_{oi} \bar{P}_i}{P_i^2} \right) \text{Arsh} \frac{-\bar{a}_{oi} \bar{P}_i}{\sqrt{\bar{a}_{oi}^2 \bar{P}_i - (\bar{a}_{oi} \bar{P}_i)^2}} - \\
 &- \frac{\bar{P}_i}{P_i^2} |\bar{a}_{oi}|; \\
 \bar{T}_{iH} &= \bar{a}_{oi} \quad \text{при} \quad S_i = 0; \\
 \bar{R}_{iK} &= \bar{a}_{1i} + \frac{1}{P_i} \left(\bar{a}_{oi} - \frac{\bar{a}_{oi} \bar{P}_i}{P_i} \bar{P}_i \right) \text{Arsh} \frac{|\bar{P}_i|^2 L_i - (\bar{a}_{oi} \bar{P}_i)}{\sqrt{\bar{a}_{oi}^2 \bar{P}_i - (\bar{a}_{oi} \bar{P}_i)^2}} \\
 &- \frac{\bar{P}_i}{P_i^2} |\bar{a}_{oi} - \bar{P}_i S_i|; \\
 \bar{T}_{iK} &= \bar{a}_{oi} - \bar{P}_i S_i \quad \text{при} \quad S_i = L_i,
 \end{aligned} \right\} (4)$$

где $i = I, II, III$ и соответственно $L_i = L; L-2L_r; L_r$.

Так как $\bar{T}_{iK} = \bar{T}_{iH}$ и $\bar{T}_{iK} = \bar{T}_{iH}$ (гирлянды изоляторов и про-
 вода шин абсолютно гибкие нити), то после преобразований
 систему (4) запишем в следующем удобном для решения виде:

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{a}_{oI} &= \bar{a}_{oII} + \bar{P}_r L_r; \\
 \bar{a}_{oIII} &= \bar{a}_{oII} + \bar{P}_r (L - 2L_r); \\
 \bar{a}_{1I} &= \bar{R}_{iH} - \frac{1}{P_r} \left(\bar{a}_{oi} - \frac{\bar{a}_{oi} \bar{P}_r}{P_r^2} \bar{P}_r \right) * \\
 &* \text{Arsh} \frac{-\bar{a}_{oi} \bar{P}_r}{\bar{P}_r} + \frac{\bar{P}_r}{P_r^2} |\bar{a}_{oi}|; \\
 \bar{R}_{iK} &= \bar{a}_{1I} + \frac{1}{P_r} \left(\bar{a}_{oi} - \frac{\bar{a}_{oi} \bar{P}_r}{P_r^2} \bar{P}_r \right) *
 \end{aligned} \right\} (5)$$

$$\begin{aligned}
 & \times \operatorname{Arsh} \frac{P_r^2 L_r - (\bar{a}_{oI} \bar{P}_r)}{B_I} - \frac{\bar{P}_r}{P_r^2} \left| \bar{a}_{oI} - \bar{P}_r L_r \right|; \\
 & \bar{a}_{1III} = \bar{R}_{IIIk} - \frac{1}{P_r} \left(\bar{a}_{oIII} - \frac{\bar{a}_{oIII} \bar{P}_r}{P_r^2} \bar{P}_r \right) \times \\
 & \times \operatorname{Arsh} \frac{P_r^2 L_r - (\bar{a}_{oIII} \bar{P}_r)}{B_{III}} + \frac{\bar{P}_r}{P_r^2} \left| \bar{a}_{oIII} - \bar{P}_r L_r \right|; \\
 & \bar{R}_{IIk} = \bar{a}_{1III} + \frac{1}{P_r} \left(\bar{a}_{oIII} - \frac{\bar{a}_{oIII} \bar{P}_r}{P_r^2} \bar{P}_r \right) \times \\
 & \times \operatorname{Arsh} \frac{-\bar{a}_{oIII} \bar{P}_r}{B_{III}} - \frac{\bar{P}_r}{P_r^2} \left| \bar{a}_{oIII} \right|; \\
 & \bar{a}_{1II} = \bar{R}_{Ik} - \frac{1}{P_{np}} \left(\bar{a}_{oII} - \frac{\bar{a}_{oII} \bar{P}_{np}}{P_{np}^2} \bar{P}_{np} \right) \times \\
 & \times \operatorname{Arsh} \frac{-\bar{a}_{oII} \bar{P}_{np}}{B_{II}} + \frac{\bar{P}_{np}}{P_{np}^2} \left| \bar{a}_{oII} \right|; \\
 & \bar{a}_{oII} = \frac{(\bar{R}_{IIk} + \bar{a}_{1II} + \frac{\bar{P}_{np}}{P_r^2} \left| \bar{a}_{oII} - \bar{P}_{np} (L - 2L_r) \right|) P_{np}}{\operatorname{Arsh} \frac{P_{np}^2 (L - 2L_r) - (\bar{a}_{oII} \bar{P}_{np})}{B_{II}}} + \\
 & + \frac{\bar{a}_{oII} \bar{P}_{np}}{P_{np}^2} \bar{P}_{np}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

где $B_i = \sqrt{\bar{a}_{oi}^2 P_i^2 - (\bar{a}_{oi} \bar{P}_i)^2}$, $i = I, II, III$.

Система трансцендентных уравнений (5) решена методом Вегстейна.

По известным постоянным интегрирования \bar{a}_{oi} и \bar{a}_{1i} определяется пространственное положение и тяжение гибких шин РУ с учетом гирлянд изоляторов.

Выше суммарная длина гибких шин с изоляторами L принималась в качестве исходной величины. Определение L является самостоятельной задачей. L можно определить при известном тяжении в "нулевой точке" (T_0), удельных монтажных нагрузках, длине гирлянд изоляторов, граничных векторах $\bar{R}_{\text{IIIк}}$, $\bar{R}_{\text{Iн}}$.

Как следует из рис. 1,

$$x_{\text{IIIк}} - x_{\text{Iн}} = L_x, \quad (6)$$

где L_x - проекция длины пролета на ось x ; $x_{\text{IIIк}}$, $x_{\text{Iн}}$ - проекций векторов $\bar{R}_{\text{IIIк}}$, $\bar{R}_{\text{Iн}}$ на ось x .

Поскольку $x_{\text{IIIк}}$ в соответствии с (4) можно выразить через L , то это приводит после преобразований к решению системы уравнений (5) в проекциях на ось x , в которой 8-е уравнение разрешено относительно L :

$$L = 2L_{\Gamma} + \frac{1}{P_{\text{пр}}^2} (\bar{a}_{\text{оII}} \bar{P}_{\text{пр}} + \text{sh}(y) B_{\text{II}}). \quad (7)$$

Здесь

$$x_{\text{IIIк}} - a_{\text{IIIк}} + \frac{P_{\text{пр}x}}{P_{\text{пр}}^2} \sqrt{a_{\text{оII}}^2 - 2(L - 2L_{\Gamma})(\bar{a}_{\text{оII}} \bar{P}_{\text{пр}}) + \dots x}$$

$$y = \frac{\frac{1}{P_{\text{пр}}} (a_{\text{оII}x} - \frac{\bar{a}_{\text{оII}} \bar{P}_{\text{пр}}}{P_{\text{пр}}^2} P_{\text{пр}x})}{+ \bar{P}_{\text{пр}}^2 (L - 2L_{\Gamma})^2} \dots x$$

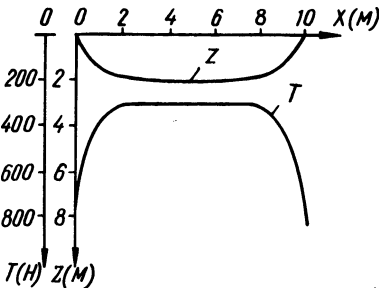


Рис. 2. Результаты расчета по программе шинги: $L_x = 10$ м; $L_{\Gamma} = 2,4$ м; $P_{\Gamma z} = 287,5$ Н; $P_{\text{пр}z} = 8,54$ Н.

По разработанному алгоритму составлена программа на языке „Фортран“ для ЭЦВМ „Минск-32“.

На рис. 2 приводятся результаты расчета по составленной программе.

Л и т е р а т у р а

1. Стрелюк М.И., Сергей И.И. Расчет электродинамических усилий в трехфазной системе гибких проводов. - Изв. вузов СССР. Энергетика, 1975, № 11. 2. Годунов С.К., Рябенский В.С. Введение в теорию разностных схем. М., 1962. 3. Бошнякович А.Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП. Л., 1975. 4. Кессельман Л.М., Денисов Ю.М. Векторный метод расчета тяжелой гибкой нити. - В сб.: Проектирование энергосистем и электрических сетей, вып. III. Ташкент, 1967.

УДК 621.315.21:537.312.62

И.А.Ступак

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КРИОГЕННЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Исследования линий высокой электропроводности путем создания экспериментальных установок в основном нацелены на получение различных электрических, теплофизических, электродинамических и других параметров. Но они не дают возможности непосредственно определить количественные и тем более эксплуатационные показатели надежности данных линий. Это связано с тем, что определяемые параметры не имеют четко выраженных критериев для обоснования надежности криогенных кабельных линий, что осложняет их всестороннюю оценку.

Однако можно найти определенный подход к предварительной оценке некоторых показателей, используя статистические данные об отказах.

Есть основания предполагать, что один из основных критериев надежности криокабеля (общее количество отказов) характеризуется электрическими, тепловыми, электрофизическими, механическими, эксплуатационными и другими причинами. Уровень этих факторов определяет состояние надежности системы криокабеля.

При анализе общего количества отказов криогенной кабельной линии учитываются отказы не только по указанным причинам, но и возможным их сочетанием.

Математической моделью процесса эксплуатации криогенной кабельной линии может служить случайный процесс, характеризующийся последовательностью чередующихся интервалов работоспособности и восстановления (рис. 1).

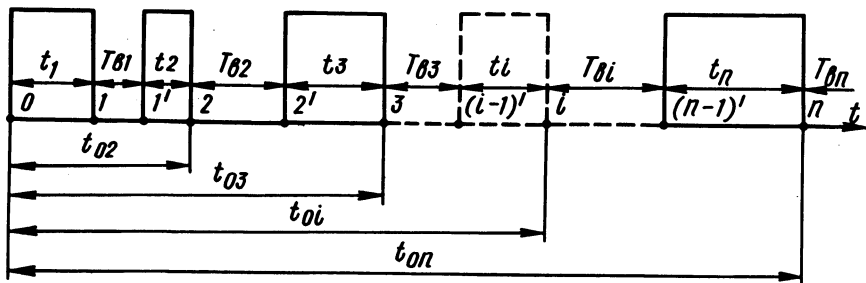


Рис. 1. Математическая модель процесса эксплуатации криогенной кабельной линии: t_1 – время нормального функционирования элемента от момента включения в эксплуатацию ($t. 0$) до первого отказа ($t. 1$); t_2 – промежуток времени, исчисляемый с момента выхода элемента на рабочий режим по истечению времени первого восстановления ($T_{в1}$) до следующего отказа ($t. 2$) – соответственно $t_3, \dots, t_i, \dots, t_n; T_{в1}, \dots, T_{ви}, \dots, T_{вn}$ – время простоя, т.е. случайное время вынужденного пребывания криокабеля в состоянии неработоспособности после $1, 2, 3, \dots, i, \dots, n$ отказов. Моменты выхода устройства на рабочий режим помечены соответственно точками $1', 2', \dots, (i-1)', \dots, (n-1)$; $t_{02}, \dots, t_{0i}, \dots, t_{0n}$ – суммарные временные периоды функционирования системы от момента включения в эксплуатацию ($t.0$) до момента прекращения исследования.

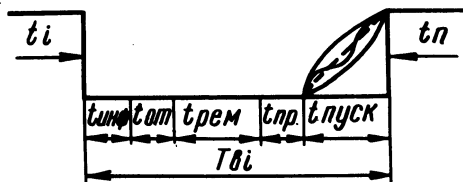


Рис. 2. Временная диаграмма составляющих суммарного времени восстановления работоспособности системы криокабеля: $t_{инф}$ – информационное время на оповещение обслуживающего персонала звуковым, световым или иным сигналом о возникновении повреждения или нарушении

режима работы криокабеля; $t_{от}$ – время, затраченное ремонтно-обслуживающим персоналом, на отыскание возникшего отказа элемента криокабеля (узла, блока, системы); $t_{рем}$ – время, затраченное обслуживающим персоналом, на восстановление (ремонт) отказавшего устройства (элемента, узла, блока, системы); $t_{пр}$ – затраченное время на проверку восстановления элемента криокабеля (узла, блока и т.д.) за период $t_{рем}$ с целью заключения о его исправности и что он после включения сразу не откажет; $t_{пуск}$ – время, затраченное обслуживающим персоналом на пуск элементов установки криокабеля до выхода на рабочий режим.

Время нормальной работы криогенной кабельной линии (элемента, узла, блока) между отказами (наработку на отказ) t_1, t_i, \dots, t_n можно определить исходя из рассмотрения рис. 1, а суммарные временные периоды функционирования системы с учетом всех восстановлений соответствуют формуле

$$t_{on} = \sum_{i=1}^k t_i + \sum_{j=1}^n T_{Vi}, \quad (1)$$

где k и n - соответственно общее количество суток нормальной работы и восстановлений с выходом на рабочий режим криокабеля (элемента, узла, блока) за рассматриваемый период исследования ($i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, n$).

Общее время восстановления работоспособности системы (элемента, узла, блока) - это суммарное время (T_{Vi}) от момента отказа до момента выхода на рабочий режим. Составляющие суммарного времени восстановления работоспособности криокабеля оцениваются по временной диаграмме. (рис. 2)

$$T_{Vi} = t_{инф} + t_{от} + t_{рем} + t_{пр} + t_{пуск}. \quad (2)$$

Определив суммарную наработку на отказ, время восстановления работоспособности и суммарные временные периоды функционирования за исследуемый период наблюдения, можно обработать статистические данные на ЭВМ. Для этого необходимо имеющуюся информацию об отказах и восстановлениях сгруппировать в массивы в виде вариационного ряда и исследовать на ЭВМ с целью определения закона распределения времени безотказной работы. По полученным данным построить эмпирические и теоретические графики плотности распределения и определить ряд количественных и эксплуатационных показателей надежности - математическое ожидание $M(x)$, дисперсию $D(x)$, интенсивность отказов (λ) и коэффициенты: готовности $(K_г)$, ремонтпригодности ($K_р$), использования ($K_и$), простоя $(K_п)$ и стоимости эксплуатации ($K_э$) [1].

На надежность криогенной кабельной линии оказывают влияние и другие факторы: как стабилизация сверхпроводника, локализация мест повреждения изоляции при коротком замыкании методом "самозалечивания", восстановление работоспособности кабеля при исчезновении явления сверхпроводимости от повышения температуры выше критической и многие другие причины, требующие тщательной разработки и решения.

Л и т е р а т у р а

1. Сотсков Б.С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники, М., 1970.

Ю.Н.Петренко, канд.техн.наук,
Е.П.Самыков

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОДАЧИ

В плоскошлифовальных станках поперечная периодическая подача суппорта осуществляется периодически в момент выхода круга из зоны шлифования. Величина подачи зависит от времени включенного питания электродвигателя поперечной подачи. В станках модели 3711 включение двигателя подачи осуществляется (рис. 1) замыканием нулевой точки вторичной обмотки трансформатора Тр., образованной с помощью выпрямительного моста Вп. 1. Для торможения привода производится замыкание нулевой точки конденсаторов через выпрямительный мост Вп. 2, в результате чего имеет место конденсаторное торможение. В качестве ключевых элементов в этих цепях применяются тиристоры, которые вместе со схемами управления и устройствами принудительной коммутации образуют блок пуска и блок торможения [1].

В существующем электроприводе время работы электродвигателя, а следовательно, и величина периодической подачи определяются постоянной времени задающей цепочки, состоящей из последовательно включенных конденсатора и переменного сопротивления, которое и является задающим органом. Такая схема не обеспечивает сохранение заданной величины подачи на одном и том же уровне из-за изменения параметров задающей цепочки и порога срабатывания транзисторов, управляемых ею. Кроме того, такое устройство затрудняет оператору установку строго определенной величины подачи, что отрицательно сказывается на производительности станка, так как задание величины подачи с определенным запасом приводит к увеличению машинного времени.

Указанные недостатки могут быть устранены с помощью дискретных устройств, функциональная схема которых приведена на рис. 1. Задание величины подачи в виде числа оборотов двигателя осуществляется с помощью четырех декадных переключателей, подключенных ко входу блока сравнения. Ко-

манда на начало подачи поступает через блок управления с бесконтактного конечного выключателя БВК при прохождении диамагнитной пластины через его зазор в крайнем положении стола.

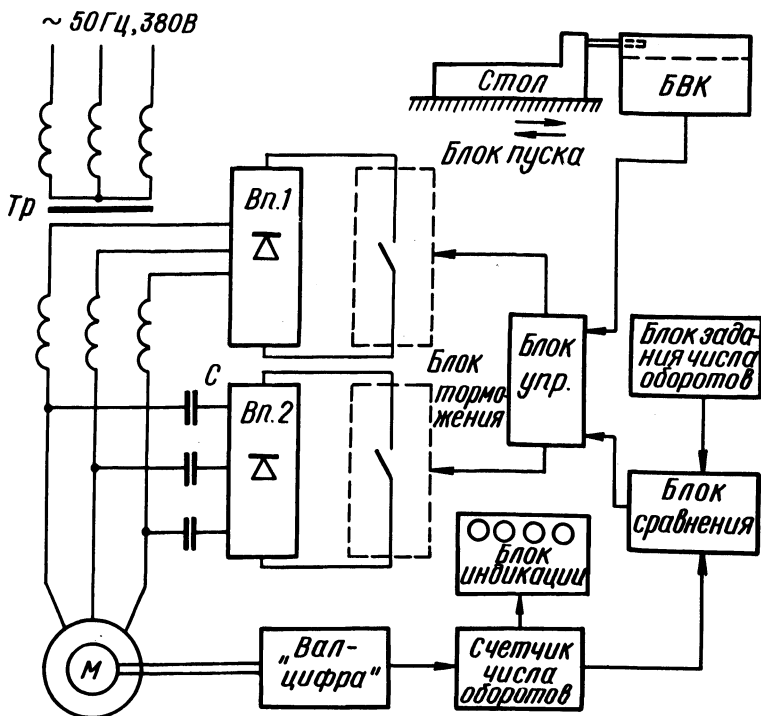


Рис. 1. Функциональная схема привода периодической подачи плоскошлифовального станка.

Информация об отработке подачи поступает с выхода преобразователя "вал-цифра" в виде последовательности импульсов и накапливается в счетчике числа оборотов. Последний состоит из четырех двоичных тетрад, каждая из которых имеет дешифратор, преобразующий двоичный код в десятичный. Выходы дешифраторов подключены ко второму входу блока сравнения. Когда фактически отработанное число оборотов станет равным заданному, блок сравнения вырабатывает сигнал, который используется для отключения тиристора блока пуска и для включения тиристора блока торможения. Начинается торможение электропривода.

Для удобства визуального отсчета выходы дешифраторов через элементы "НЕ" подключены к соответствующим катодам индикаторных ламп типа ИН-1. Последнее особенно удобно при наладке схемы.

При работе в периодическом режиме необходимо гашение информации о величине подачи в течение предыдущего цикла. Команда на гашение счетчика и индикаторных ламп подается после окончания торможения с выдержкой времени, достаточной для визуального счета показаний. После этого привод готов к следующему циклу работы [2].

В качестве преобразователя "вал-цифра" применен диск с десятью отверстиями, находящийся на одном валу с двигателем. При совпадении отверстия диска с лучом от осветительной лампочки фотодиод вырабатывает импульсы. Декадные переключения блока задания позволяют задать $10^2, 10^1, 10^0, 10^{-1}$ оборотов двигателя. Аналогичную цену деления имеют лампы блока индикации.

Изготовленный лабораторный макет показал ее высокую надежность. Применение стандартных элементов дискретной электроники серии 511, устойчивой к помехам, что особенно важно в условиях эксплуатации, позволяет свести к минимуму операции по наладке схемы.

Предложенная схема может найти применение в приводах периодических подач ряда механизмов других металлорежущих станков.

Л и т е р а т у р а

1. Станок плоскошлифовальный с крестовым прямоугольным столом и горизонтальным шпинделем 3701-3711. Руководство по эксплуатации. Витебск, 1976. 2. Петренко Ю.Н., Гульков Г.И., Самыков Е.П. Привод периодической попеременной подачи плоско-шлифовального станка. Авт. свид. № 617235. - Бюлл. изобрет., 1978, № 28.

В.И.Шафранский, канд.техн.наук,
Б.В.Боровой, канд.техн.наук

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ СВЯЗЕЙ НА ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

При расчете переходных процессов с учетом упругих связей резко возрастает объем вычислительной работы. В связи с этим ставится задача определить степень влияния упругих связей на переходный процесс и тем самым решить вопрос о целесообразности их учета, не рассчитывая переходного процесса.

В качестве показателя влияния упругих связей на переходный процесс можно принять отношение

$$K_y = \frac{\int_0^{\infty} M_y^2 dt}{\int_0^{\infty} M_{ж}^2 dt}, \quad (1)$$

которое назовем коэффициентом влияния упругих связей. Здесь $M_{ж}$, M_y - переходная составляющая момента соответственно при абсолютно жестких и упругих связях.

Как известно, при скачкообразном изменении нагрузки переходная составляющая момента двигателя с линейной механической характеристикой при абсолютно жестких связях определяется выражением [1]

$$M_{ж} = \Delta M e^{-\frac{t}{T}}$$

Здесь ΔM - приращение момента нагрузки; T - электромеханическая постоянная времени электропривода.

Следовательно,

$$\int_0^{\infty} M_{ж}^2 dt = \frac{(\Delta M)^2 T}{2}. \quad (2)$$

Согласно [2] переходная составляющая момента двигателя с линейной механической характеристикой при наличии упругих связей между двигателем и механизмом описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{T}{\omega^2} M_y''' + \frac{i}{\omega^2} M_y'' + T M_y' + M_y = 0.$$

Здесь $i = \frac{J_D + J_M}{J_D}$ - момент инерции электропривода (двигателя и механизма) в долях от момента инерции двигателя;

$\omega = \sqrt{\frac{c(J_D + J_M)}{J_D J_M}}$ - угловая частота собственных колебаний

двухмассовой системы; c - жесткость соединительных элементов.

Умножим обе части этого уравнения поочередно на M_y'' , M_y' и M_y . В результате получим следующие три уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{T}{\omega^2} M_y''' M_y'' + \frac{i}{\omega^2} M_y''^2 + T M_y' M_y'' + M_y M_y'' &= 0; \\ \frac{T}{\omega^2} M_y''' M_y' + \frac{i}{\omega^2} M_y'' M_y' + T M_y' ^2 + M_y M_y' &= 0; \\ \frac{T}{\omega^2} M_y''' M_y + \frac{i}{\omega^2} M_y'' M_y + T M_y' M_y + M_y^2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Проинтегрируем почленно эти уравнения в пределах от 0 до ∞ , применяя способ интегрирования по частям. Например,

$$\int_0^{\infty} M_y M_y' dt = \int_0^{\infty} u dv = uv \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} v du.$$

Здесь $u = M_y$; $dv = M_y' dt$. Так как

$$du = M_y' dt, \quad v = \int_0^{\infty} M_y' dt = M_y,$$

то

$$\int_0^{\infty} M_y M_y' dt = M_y^2 \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} M_y M_y' dt.$$

Отсюда находим

$$\int_0^{\infty} M_y M_y' dt = \frac{M_y^2}{2} \Big|_0^{\infty}.$$

Для устойчивой системы электропривода при $t = \infty$ переходная составляющая момента $M_y(\infty) = 0$, а при $t = 0$ равна приращению момента нагрузки с обратным знаком, т.е. $M_y(0) = -\Delta M$.

Следовательно,

$$\int_0^{\infty} M_y M_y' dt = \frac{M_y^2(0)}{2} = \frac{(\Delta M)^2}{2}.$$

Производя подобным образом интегрирование для других членов уравнений (3) и учитывая, что все производные при $t = 0$ равны нулю (до переходного процесса двигатель работал в установившемся режиме) и при $t = \infty$ также равны нулю (система электропривода устойчива), получим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{i}{\omega^2} &= I_y'' - I_y' = 0; \\ -\frac{i}{\omega^2} I_y'' + T I_y' &= \frac{(\Delta M)^2}{2}; \\ \frac{i}{\omega^2} I_y' + I_y &= \frac{T}{2} (\Delta M)^2. \end{aligned} \right\} (4)$$

Здесь $I_y = \int_0^{\infty} M_y^2 dt$; $I_y' = \int_0^{\infty} M_y'^2 dt$; $I_y'' = \int_0^{\infty} M_y''^2 dt$; Решая систему уравнений (4) относительно I_y , находим

$$I_y = \frac{(\Delta M)^2 (i\omega^2 T^2 - \omega^2 T^2 + i^2)}{2\omega^2 T(i-1)}. \quad (5)$$

Тогда на основании (1) с учетом (2) и (5) коэффициент влияния упругих связей можно представить в виде

$$K_y = \frac{i\omega^2 T^2 - \omega^2 T^2 + i^2}{\omega^2 T^2 (i-1)} = 1 + \frac{i^2}{\omega^2 T^2 (i-1)}. \quad (6)$$

Легко также решить и такую задачу: подобрать параметры таким образом, чтобы коэффициент влияния упругих связей не превышал некоторой наперед заданной величины q , т.е. чтобы $K_k < q$. Этому условию удовлетворяет неравенство

$$\omega^2 T^2 > \frac{i^2}{(i-1)(q-1)}. \quad (7)$$

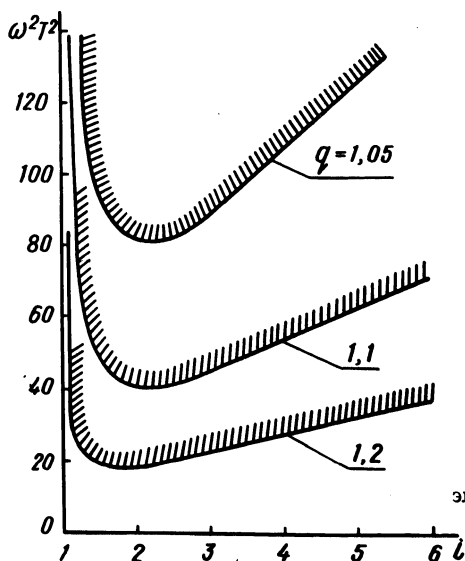


Рис. 1. Выделение областей параметров электропривода, при которых $K_y < q$.

По (7) на рис. 1 построены кривые для различных значений q . Штриховка обращена в область параметров $\omega^2 T^2$ и i , при которых $K_y < q$.

Л и т е р а т у р а

1. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. М. - Л., 1963.
2. Квартальнов Б.В. Динамика электроприводов с упругими связями. М., 1965.

СИНТЕЗ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ДИСКРЕТНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ ОТКЛОНЕНИЯ

В промышленности часто возникают задачи для определенного класса машин, согласование движений отдельных узлов или механизмов линий для обеспечения заданных технологических показателей качества. Многие динамические системы позволяют ограничиться изменением управляющего воздействия через определенные промежутки времени [1,2].

Таким образом, задача синтеза автоматической системы управления состоит в определении дискретных управляющих воздействий через определенные промежутки времени T на интервале $t_k = t_0$, $t = mT$, обеспечивающих минимум квадратичного критерия J^0 (рис. 1).

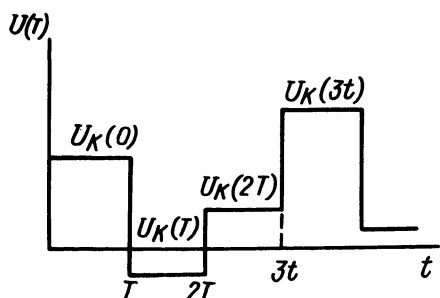


Рис. 1.

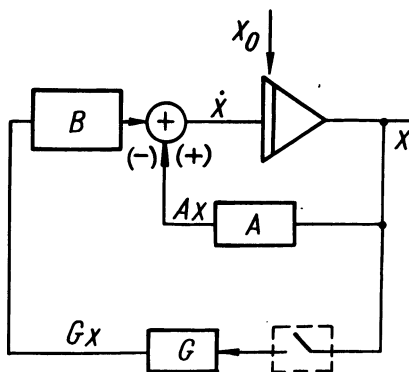


Рис. 2.

Рассмотрим электромеханические объекты, связанные между собой единым технологическим процессом и описываемые системой дифференциальных уравнений в векторной форме

$$X(t) = AX(t) + BU(t); X(0) = X_0; t \in (0, t_k), \quad (1)$$

где X - вектор n -состояния системы; A - матрица $n \times n$ коэффициентов объекта; B - матрица $n \times n$ весовых коэффициентов; U - вектор n управления, оптимальный в смысле минимума функционала:

$$J(X, t, U) = \int_0^{mT} [X^T(t)QX(t) + U^T(t)CU(t)] dt, \quad (2)$$

где Q матрица $(2n-1)(2n-1)$ постоянная положительно полуопределенная; C - матрица $m \times m$ постоянная определено положительная.

Последовательность дискретных управлений определяется

$$U(t) = U_k; \quad T \leq t \leq (k+1)T; \quad k = 0, 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Если $\phi(t, t_0)$ есть переходная матрица однородного дифференциального уравнения

$$\dot{X} = AX(t), \quad (4)$$

то можно записать выражение, характеризующее состояние при $(k+1)T$ в зависимости от состояния при kT и постоянной величине сигнала управления $U(kT)$,

$$X[(k+1)T] = \phi(T, 0)X(kT) + R(T, 0)U(kT); \quad X(0) = X. \quad (5)$$

Очевидно, что матрицы ϕ , R инварианты во времени и зависят только от дискретного промежутка времени T

$$\phi[(k+1)T, kT] = e^{A[(k+1)T - kT]} = e^{AT} = \phi(T, 0). \quad (6)$$

Аналогично

$$R[(k+1)T, kT] = R(T, 0). \quad (7)$$

Рассматривая квадратичный критерий для автоматической системы с дискретными управляющими воздействиями, его можно представить как интеграл в пределах от k до n .

$$J(X, t, U) = \sum_{k=0}^{m-1} \int_{kT}^{(k+1)T} [X^T(t)QX(t) + U^T(t)CU(t)] dt. \quad (8)$$

Если решение уравнения (1) подставляется в каждый интеграл и если U постоянно в интервале T (каждого интегрирования), квадратичный функционал будет

$$J(X, t, U) = \sum_{k=0}^{m-1} \left[X^T(kT) \hat{Q}(T, 0) X(kT) + 2X^T(kT) M(T, 0) U(kT) + U^T(kT) \hat{C}(T, 0) U(kT) \right] \quad (9)$$

Аналогично (6), (7) матрицы \hat{Q} , M , C инварианты во времени и зависят только от времени T дискретного промежутка:

$$\left. \begin{aligned} \hat{Q}[(k+1)T, kT] &= \hat{Q}(T, 0); \\ M[(k+1)T, kT] &= M(T, 0); \\ \hat{C}[(k+1)T, kT] &= \hat{C}(T, 0). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Если Q и C положительно определены и полуопределены, соответственно имеем \hat{Q} и \hat{C} . Необходимо, чтобы преобразования сохранили свойства, так как это является требованием для существования решения. Для оптимального решения при дискретном управляющем воздействии упростим соотношения:

$$\begin{aligned} X[(k+1)T] &\cong X_{k+1}; \quad U(kT) \cong U_k; \\ \Phi(T, 0) &\cong \Phi; \quad \hat{C}(T, 0) \cong \hat{C}. \end{aligned} \quad (11)$$

Тогда задача для дискретных уравнений запишется так:

$$X_{k+1} = \Phi X_k + R U_k. \quad (12)$$

При этом решение (12) определяет последовательность управлений U_k^* , $k=0, 1, 2, \dots, m-1$, соответствующую траекторию движения X_k^* , минимизирующую квадратичный функционал

$$J = \sum_{k=0}^{m-1} \left[X_k^T \hat{Q} X_k + 2X_k^T M X_k + U_k^T \hat{C} U_k \right]. \quad (13)$$

Таким образом получили аналогию непрерывного регулятора при дискретной информации о состоянии и дискретных управляющих воздействиях, т.е. дискретный временной аналог линейного непрерывного регулятора.

Считая, что \hat{Q} - положительно полуопределено, C - положительно определена, Φ - системная матрицы для любого интервала T , последовательность управлений U_k^* , минимизирующих

функционал J для любого ряда начальных условий X_0 , определяется:

$$U_K^* = - \left\{ \hat{C}^{-1} M^T + [\hat{C} + R^T \hat{K} R]^{-1} R^T \hat{K} [\phi - R \hat{C}^{-1} M^T] \right\} X_K^*$$

или $U_K^* = G X_K^*$.

Матрица K определяется из нелинейного матричного уравнения. При $K \rightarrow -\infty$ и $K = 0$, $K = K_K$

$$K_K = [\phi - R \hat{C}^{-1} M^T] [K_{k+1} - K_{k+1} R (\hat{C} + R^T K_{k+1} R)^{-1} R K_{k+1}] \times \\ \times [\phi - R \hat{C}^{-1} M^T] + [\hat{Q} - M C^{-1} M^T].$$

Решение приводят к закону оптимального уравнения. Это уравнение является дискретным аналогом матричного дифференциального уравнения Риккати.

Элементы постоянной матрицы K определяются решением дифференциальных уравнений на ЭВМ.

Существование и определенность решения установившегося состояния гарантируется полной управляемостью системы.

Если матрицу K определить численно, тогда коэффициент усиления обратной связи G определяется из уравнения

$$G = \hat{R}^{-1} M^T + (\hat{C} + R^T \hat{K} R)^{-1} R^T \hat{K} (\phi - R \hat{C}^{-1} M^T).$$

Закон $U_K^* = C X_K^*$ требует получения информации о параметрах в момент времени, характеризующий предыдущий интервал kT для оценки управления на участке $(k+1)T$.

Замкнув систему, получим

$$\dot{X}^*(t) = A X^*(t) - B C X^*(kT);$$

$$T \leq t \leq (k+1)T.$$

Структурная схема представлена на рис. 2.

Из приведенных уравнений синтеза системы автоматического управления с дискретной информацией о состоянии следует, что может быть сформирован дискретный временной аналог линейного непрерывного регулятора.

Область его применения может охватить класс машин, где по технологическим условиям управляющее воздействие на определенном отрезке времени может быть постоянным (пря- дильные машины корда, формирующие ДСП, транспортные уст- ройства и т.д.)

Л и т е р а т у р а

1. Атанс М., Фалб П. Оптимальное управление. М., 1968. 2. Летов А.М. Динамика полета и управления. М., 1969.

УДК 621.373.213.3

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

СИНТЕЗ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ

При разработке ряда исполнительных следящих электропри- водов требуется инвариантность динамических свойств системы к вариациям ее параметров. Самонастраивающиеся системы с эталонной моделью позволяют получить высокое качество регу- лирования объектом с переменными параметрами. Авторами [1] предложен метод синтеза САУ с эталонной моделью объек- том высокого порядка с переменными параметрами, который позволяет построить высококачественную систему управления при наличии информации только о выходной координате объекта и ее первой производной. Сущность метода заключается в том, что вначале производится предварительная коррекция объекта таким образом, чтобы

$$\alpha_3 \geq -10 |\alpha_{1,2}| ; \quad (1)$$

$$\frac{A_3}{A_{1,2}} < 1, \quad (2)$$

где $\alpha_{1,2}, \alpha_3$ - действительная часть соответственно домини- рующих полюсов и ближайшего к ним полюса; $A_{1,2}, A_3$ - ам- плитуда составляющей решения $x(t)$ от доминирующих полюсов и ближайшего к ним полюса.

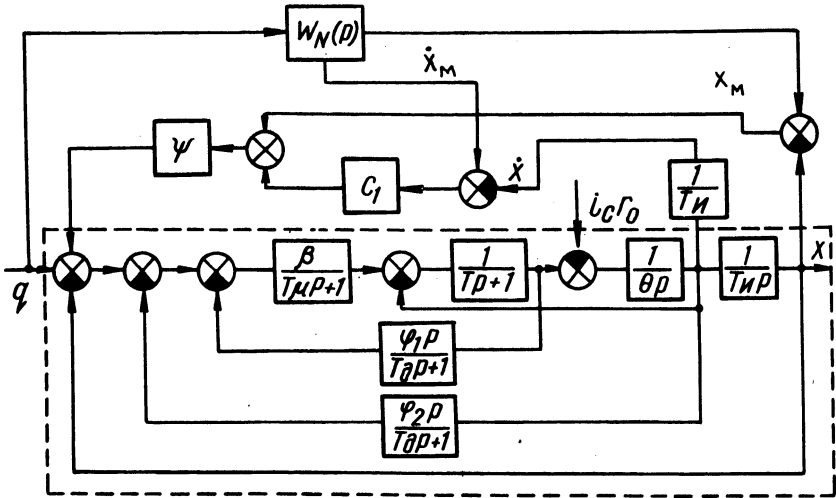


Рис. 1. Структурная схема следящей системы: β – коэффициент усиления преобразователя; T_M – постоянная времени преобразователя; T – электромагнитная постоянная времени; θ – электромеханическая постоянная; T_I – постоянная времени интегратора; T_D – постоянная времени реального дифференцирующего устройства.

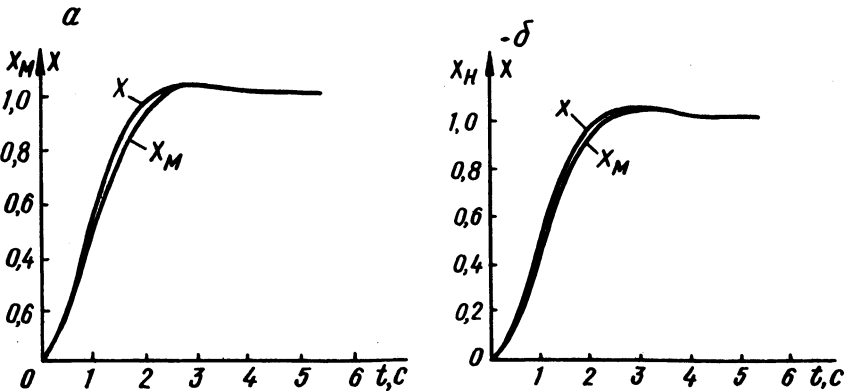


Рис. 2. Графики переходных процессов эталонной модели и объекта: а – $T_M = 0,005$ с; $\beta = 100$; $T = 0,02$ с; $\theta = 0,02$ с; $T_I = 5$ с; б – $\theta = 0,1$ с; $T = 0,01$ с.

На рис. 1 представлена структурная схема следящей системы с электродвигателем постоянного тока, на котором объект регулирования обведен штриховой линией. Предварительная коррекция осуществляется гибкой отрицательной обратной связью по току и э.д.с. электродвигателя. Передаточная функция объекта регулирования без учета статического тока нагрузки электродвигателя и контура сигнальной (пассивной) самонастройки имеет вид

$$W_{об}(P) = \frac{x}{q} = \frac{T_d p + 1}{\frac{1}{\beta} \sum_{i=0}^5 b_i p^i + \sum_{i=0}^3 a_i p^i} \quad (3)$$

Здесь $a_3 = \varphi_1 \theta T_n$; $a_2 = \varphi_2 T_n$; $a_1 = T_d$; $a_0 = 1$.

При достаточно большом β (если не нарушается устойчивость) выражение (3) упрощается

$$W_{об}(P) = \frac{T_d p + 1}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} \quad (4)$$

В [1] имеются выражения требуемого соотношения между a_i для выполнения условий (1) и (2). Для случая, когда ближайшие к мнимой оси полюса комплексно-сопряженные, условие (1) имеет вид

$$\left| \frac{a_3(a_1 a_2 - a_3)}{a_2^3 + a_3(3a_3 - 2a_1 a_2)} \right|_{\max} < 0,2 \quad (5)$$

Передаточная функция эталонной модели для представленных на рис. 2 процессов имеет вид

$$W_M(P) = \frac{1}{0,5p^2 + p + 1}$$

В зависимости от конкретных требований передаточная функция эталонной модели $W_M(P)$ может быть принята другой. Графики изменения $x(t)_M$ подтверждают независимость переходных процессов от параметров системы электропривода.

Л и т е р а т у р а

1. Ильин О.П., Примшиц П.П. Синтез систем автоматического управления объектом с переменными параметрами. Рукопись депонирована в Информэлектро № 39 Д/1-64. Минск, 1977.

УДК 62-83:621.313.3-592.3

А.И.Лапидус, канд.техн.наук

ТИРИСТОРНАЯ СХЕМА ТОРМОЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

С помощью тиристорных коммутаторов можно создавать схемы управления различными режимами работы двигателей. На рис. 1 представлена разработанная тиристорная схема торможения асинхронного короткозамкнутого двигателя, которая реализует метод индукционно-динамического торможения. Тормозной эффект здесь получается в результате действия двух факторов: короткого замыкания обмоток статора через тиристор и динамического торможения. При коротком замыкании используется энергия, запасаемая в магнитном поле машины до торможения [1]. Динамическое торможение обусловлено постоянной составляющей тока в обмотках статора.

Схема работает следующим образом. С подачей команды на торможение отключается контактор вращения К и размыкаются его замыкающие силовые контакты. При этом две фазные обмотки статора через размыкающий контакт этого контактора, вентиль ВЗ и резистор RЗ подключаются к катушке реле РП, параллельно которой присоединена емкость С. Под действием э.д.с., наведенной в обмотках статора затухающим магнитным полем машины, срабатывает реле РП. Причем емкость С создает задержку на включение реле. Благодаря этой задержке поле ротора частично затухает, что приводит к уменьшению пиков тормозного момента от эффекта короткого замыкания обмоток статора при включении тиристора Т2, шунтирующего эти обмотки. Реле РП, включившись, своими контактами замыкает цепи для подачи управляющего сигнала на тиристоры Т1 и Т2. Тиристоры открываются поочередно, в зависимости от полярности приложенного напряжения.

В проводящий полупериод напряжения сети, когда открыт тиристор Т1, выпрямленный ток идет через этот тиристор, две

фазы статора и резистор R4. В следующий непроводящий полупериод закрывается тиристор T1 и за счет запасенной в двигателе электромагнитной энергии открывается тиристор T2. Таким образом, через обмотки статора в течение всего периода протекает ток в одном направлении, обеспечивая тем самым интенсивное безвибрационное торможение двигателя. Интенсивность торможения регулируется резистором R4. Контроль длительности торможения осуществляется реле РП, включенное состояние которого определяется временем разряда емкости C на катушку реле РП.

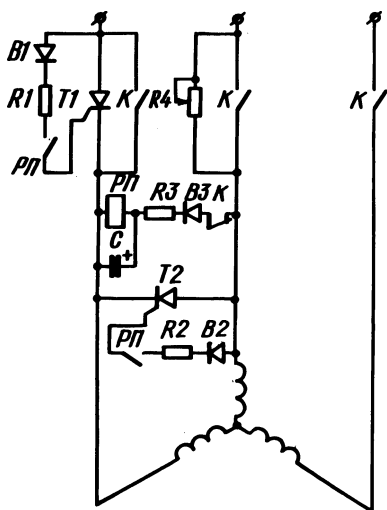


Рис. 1. Схема торможения.

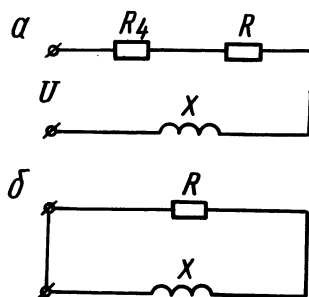


Рис. 2. Схемы замещения двигателя в тормозном режиме: а – для проводящей части периода; б – для непроводящей части периода.

На рис. 2 представлены схемы замещения двигателя в тормозном режиме: для проводящего полупериода (рис. 2, а) и непроводящего (рис. 2, б). Для рассматриваемого случая $R = 2R_k$ и $X = 2X_k$, где R_k и X_k – параметры короткого замыкания машины, которые могут быть определены по [2, 3].

Для проводящей части периода справедливо уравнение

$$\frac{X}{\omega} \frac{di}{dt} + (R+R_4)i = \sqrt{2} U \sin \omega t. \quad (1)$$

Процесс, происходящий в непроводящую часть периода, описывается выражением

$$\frac{X}{\omega} \frac{di}{dt} + Ri = 0. \quad (2)$$

Решение уравнения (1) имеет вид

$$i = \frac{\sqrt{2} U}{\sqrt{(R+R_4)^2 X^2}} \left[\sin(\omega t - \varphi) C_1 e^{-\frac{R+R_4}{X} \omega t} \right], \quad (3)$$

где C_1 - постоянная интегрирования свободной, составляющей тока;

$$\varphi = \text{arctg} \frac{X}{R+R_4}.$$

Решение уравнения (2) имеет вид

$$i = C_2 e^{-\frac{R}{X}(\omega t - \theta)}, \quad (4)$$

где θ - расчетный угол, соответствующий принятому моменту начала протекания тока в короткозамкнутом контуре.

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 находятся путем совместного решения уравнений (3) и (4), исходя из условия, что ток в обмотках не может измениться скачком. Постоянная и переменные составляющие тока в различных участках схемы находятся разложением кривой тока в ряд Фурье.

Для оценки времени торможения целесообразно действительный процесс торможения заменить эквивалентным, при котором снижение скорости до полной остановки производится как бы в два этапа. На первом этапе, в зоне высоких скоростей, действует момент короткого замыкания, а на втором этапе, в зоне средних и низких скоростей, действует момент динамического торможения. Усредненное значение продолжительности первого этапа торможения может быть получено по эмпирической формуле [4]:

$$t_1 = 0,45 \frac{GD_p^2}{GD_{\text{прив}}^2} \sqrt{\frac{GD_p^2 n}{375(K + K_M)M_H}}, \quad (5)$$

где $C D_p^2$, $G D_{\text{прив}}^2$ - маховой момент соответственно ротора двигателя и привода; n - номинальная частота вращения двигателя; M_n - номинальный момент; K_n , K_M - соответственно кратность пускового и максимального моментов по отношению к номинальному.

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

$$t_2 = \frac{T_d S_{2m}}{2} \left(\frac{S_1^2 - S_2^2}{2 S_{2m}^2} + \ln \frac{S_1}{S_2} \right), \quad (6)$$

где T_d - постоянная времени привода; S_{2m} - критическое скольжение; S_1 - скольжение, с которого начинается второй этап торможения; S_2 - можно принять равным 0,03.

Общее время торможения равно

$$t_T = t_1 + t_2. \quad (7)$$

Резюме

Разработанная тиристорная схема обеспечивает высокую интенсивность торможения и наиболее целесообразна для применения в малоинерционных электроприводах станков и других производственных механизмах.

Литература

1. Лapidус А.И. Индукционно-динамическое торможение асинхронных двигателей в станочных электроприводах. - В сб.: Электротехническая промышленность, сер. "Электропривод", вып. 4, 1975.
2. Туганов М.С. Определение параметров асинхронных короткозамкнутых двигателей по каталожным данным. - Вестник электропромышленности, 1967, № 7.
3. Петров И.И., Мейстель А.М. Специальные режимы работы асинхронного электропривода. М., 1969.
4. Каплан Н.А., Лapidус А.И. Безвибрационное торможение асинхронных двигателей по несимметричным схемам с вентилями. - Электротехника, 1972, № 11.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ФОРМИРОВАТЕЛЬ ОБРАТНО ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ

Рассматриваемый функциональный преобразователь построен на принципе кусочно-линейной аппроксимации (рис. 1), осуществляющей равномерное приближение гиперболы с некоторой наперед заданной относительной погрешностью Δ . Если исходить из диодно-резисторной реализации аппроксиматора, то можно записать

$$\Delta = 1 - \frac{U_{\text{э}i} I - R_{\text{э}i} I^2}{K}, \quad (1)$$

где I – независимая (входная) координата преобразователя, которая в данном случае является током; K – коэффициент гиперболы зависимости, подлежащей аппроксимации; $U_{\text{э}i}$, $R_{\text{э}i}$ – эквивалентные параметры кусочно-линейной аппроксимирующей цепи на некотором i -ом участке аппроксимации (рис.1). Задачу расчета параметров аппроксимирующей ломаной целесообразно решить в следующей постановке: пусть заданы погрешность Δ , максимальное значение входной координаты I_{max} (U_{max}), минимальное значение выходной координаты гиперболы U_{min} и диапазон изменения переменных D ; необходимо определить число участков линейной аппроксимации n и параметры $U_{\text{э}i}$, $R_{\text{э}i}$ на каждом участке. Так как в данном случае аппроксимируемая функция – вогнутая и имеет отличную от нуля вторую производную, то задача может быть решена аналитически [1]. Пусть первый отрезок аппроксимации ограничен I_1 , I_{max} , тогда максимальные ошибки имеют место на границах отрезка, а также – внутри его. Известно, что наилучшее равномерное приближение достигнуто, если все максимальные ошибки на участке аппроксимации равны между собой [1]. Определить максимальную ошибку внутри первого участка аппроксимации можно, приравняв нулю первую производную относительной ошибки по входной координате (1):

$$\Delta' = (U_{\text{э}i} - 2R_{\text{э}i} I_{\Delta}) / K = 0,$$

откуда $I_{\Delta} = U_{\text{э}i} / 2R_{\text{э}i}$ и далее

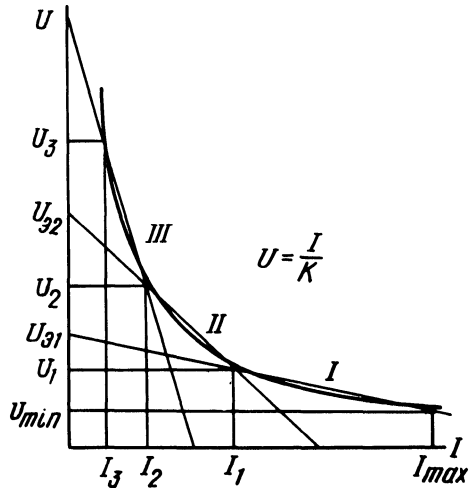


Рис. 1. Кусочно-линейная аппроксимация гиперболы.

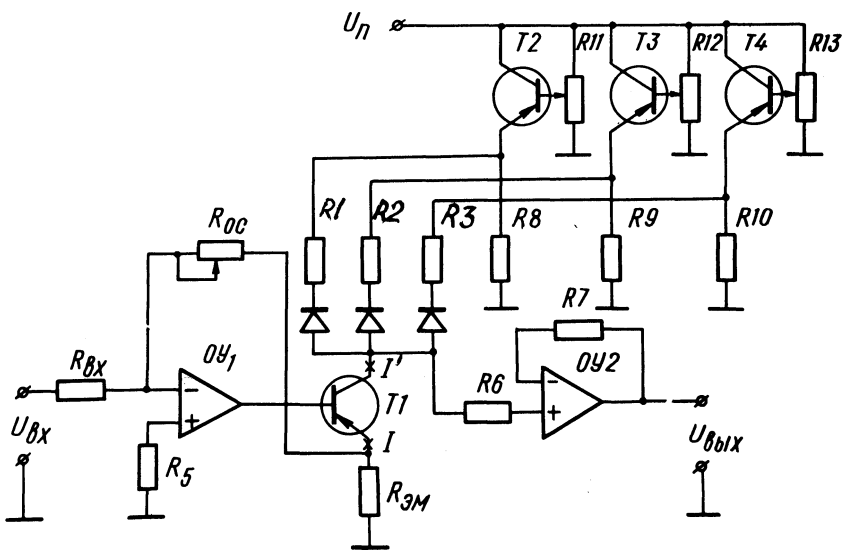


Рис. 2. Схема функционального формирователя обратно-пропорциональной зависимости.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta_{\max 1} = 1 - (U_{\text{э}i \max} I_{\text{э}i \max} - R_{\text{э}i} I_{\text{э}i \max}^2) / K; \\ \Delta_{\max 2} = 1 - \frac{U_{\text{э}1} I_{\text{э}1} - R_{\text{э}1} I_{\text{э}1}^2}{K}; \\ \Delta_{\max 3} = 1 - \frac{U_{\text{э}1}^2}{4KR_{\text{э}1}}; \\ \Delta_{\max 1} = \Delta_{\max 2} = \Delta_{\max 3} = \Delta_{\text{зад}}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Решая совместно уравнения (2), получим для i -го участка аппроксимации

$$U_{\text{э}i} = \frac{4Ka}{I_{\max} A^{i-1}} (a + \sqrt{\Delta_{\text{зад}}}); \quad (3)$$

$$R_{\text{э}i} = \frac{2K}{I_{\max}^2 A^{2i-2}} (a + \sqrt{\Delta_{\text{зад}}}); \quad (4)$$

$$I_i = I_{\max} A^i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; \quad (5)$$

$$A = \frac{a - \sqrt{\Delta_{\text{зад}}}}{a + \sqrt{\Delta_{\text{зад}}}}; \quad a = \sqrt{\frac{1 + \Delta_{\text{зад}}}{2}}; \quad K = U_{\min} I_{\max}.$$

Определим границу последнего (n -го) участка аппроксимации по току

$$I_n = I_{\max} A^n,$$

а также учтем, что $I_{\max} / I_n = D$ и выразим требуемое число участков аппроксимации в виде

$$n = -\lg D / \lg A. \quad (6)$$

На рис. 2 приведена электрическая схема формирователя, аппроксимирующего гиперболу тремя линейными участками. При диапазоне $D = 10$ и $n = 3$ относительная ошибка не превосходит 7%. Собственно аппроксиматор состоит из резисторов

R_1, R_2, R_3 , диодов и транзисторов. Транзисторы T_2-T_4 являются эмиттерными повторителями и применяются для того, чтобы избежать необходимости в низкоомных номиналах резисторов $R_{11}-R_{13}$. Усилитель OY_2 также включен по схеме повторителя напряжения, чем исключается влияние нагрузки на выходное напряжение аппроксиматора. Операционный усилитель OY_1 необходим для преобразования входного напряжения $U_{вх}$ в ток I' , причем

$$I' = I \frac{1+B_{ст}}{B_{ст}},$$

Расчет параметров аппроксиматоров можно производить по формулам

$$R_i = \frac{R_{эi} R_{эi+1}}{R_{эi+1} - R_{эi}}; \quad (7)$$

$$U_i = \frac{R_{эi+1} U_{эi} - R_{эi} U_{эi+1}}{R_{эi+1} - R_{эi}}; \quad (8)$$

$$R_{эм} = \frac{(U_{\min} - \Delta U_{кэнас}) B_{ст} + 1}{B_{ст} I_{\max}}; \quad (9)$$

$$\frac{R_{вх}}{R_{ос}} = \frac{U_{вх \max}}{U_{\min} - \Delta U_{экнас}}; \quad (10)$$

где $\Delta U_{экнас}$ - напряжение "коллектор-эмиттер" транзистора T_1 в режиме насыщения. Опытная проверка функционального формирователя показывает, что схема позволяет получить максимальную относительную погрешность 1% при $D = 10 \dots 15$, $n = 8$ (транзисторы $T_1 \dots T_{n+1}$ - 2Т203Г, усилители $OY_1 \dots OY_2$ - 1УТ402, диоды $D_1 \dots D_n$ - Д-310). Более высокая точность не может быть получена только за счет увеличения числа участков линейной аппроксимации, в этом случае необходима компенсация изменения $B_{ст}$, а также - падения напряжения на диодах аппроксиматора.

Л и т е р а т у р а

1. Алексеев Г.И. Воспроизведение функции средствами цифро-аналоговой вычислительной техники. Минск, 1976.

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ИНВЕРТОРНОМ РЕЖИМЕ

Анализ электромагнитных процессов преобразователя без нулевых вентилях в выпрямительном и инверторном режимах осуществляется по одним и тем же уравнениям с учетом знака противо-э.д.с. двигателя [1]. Нулевой вентиль приводит к изменению характера протекания электромагнитных процессов, происходящих в преобразователе при работе двигателя в двигательном и генераторном режимах. В двигательном режиме работы двигателя ток через нулевой вентиль протекает за счет разности между э.д.с. самоиндукции и противо-э.д.с. двигателя, в генераторном режиме - за счет разности между противо-э.д.с. двигателя и э.д.с. самоиндукции.

Вывод обобщенных уравнений для анализа электромагнитных процессов преобразователя в инверторном режиме произведем согласно методике, изложенной в [2].

На рис. 1, а приведена схема m -фазного выпрямителя, работающего на нагрузку с противо-э.д.с. E , имеющую активное сопротивление R и индуктивность L ; на рис. 1, б - выходное напряжение преобразователя, работающего в инверторном режиме; на рис. 1, в - ток нагрузки. Рассматривается квазистационавшийся процесс с длительностью периода λ при равенстве нулю обратных токов вентилях, их внутренних падений напряжений и полного сопротивления сети на стороне переменного тока, причем противо-э.д.с. неизменна в течение периода λ .

Кривые выходного напряжения U и тока i состоят из участков, каждый из которых описывается собственным уравнением. Количество участков n зависит от числа фаз источника синусоидального напряжения, схемы соединения вентилях и способа управления преобразователем.

За первый участок принимаем участок с наименьшим начальным значением тока i_{n1} .

В соответствии с выражением (3) [2] с учетом знака противо-э.д.с. двигателя при инверторном режиме работы преобразователя получим

$$i_{n1}^* = \varepsilon + \frac{\cos \theta}{1 - \exp(-\lambda \operatorname{ctg} \theta)} \left[\sum_{l=1}^n a_l \sin(\gamma_{al} + \lambda_l - \theta) \right]$$

$$\times \exp(-\lambda_{k1} \operatorname{ctg} \theta) - \sum_{l=1}^n a_l \sin(\psi_{3l} - \theta) \exp(-\lambda_{n1} \operatorname{ctg} \theta) \Big], \quad (1)$$

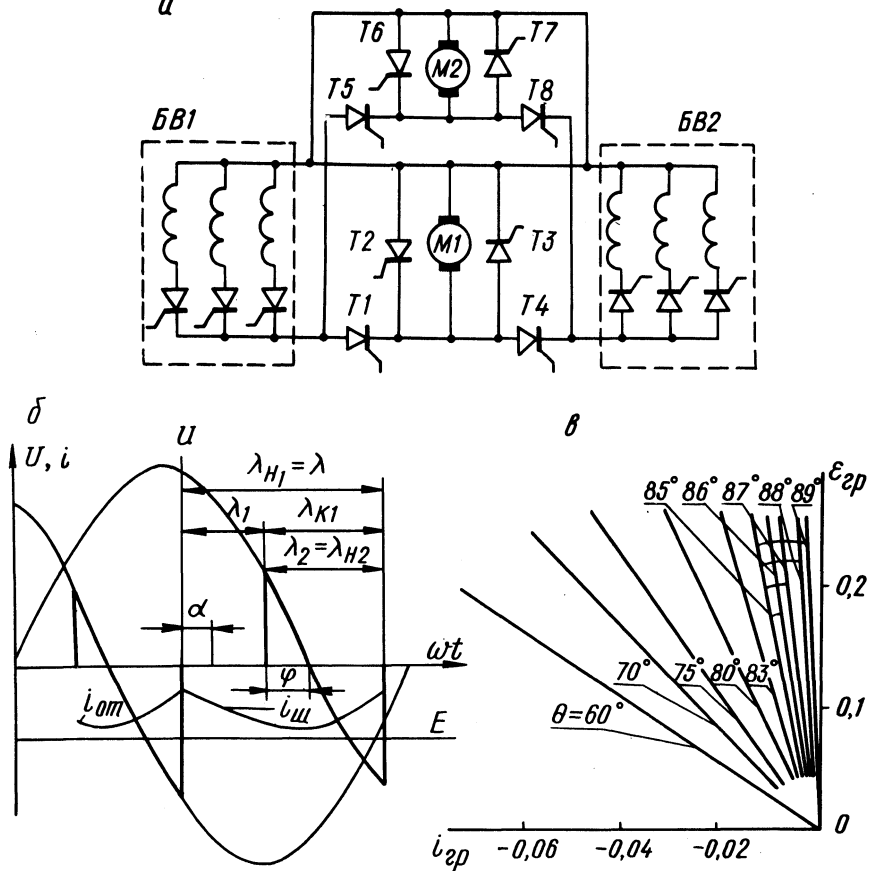
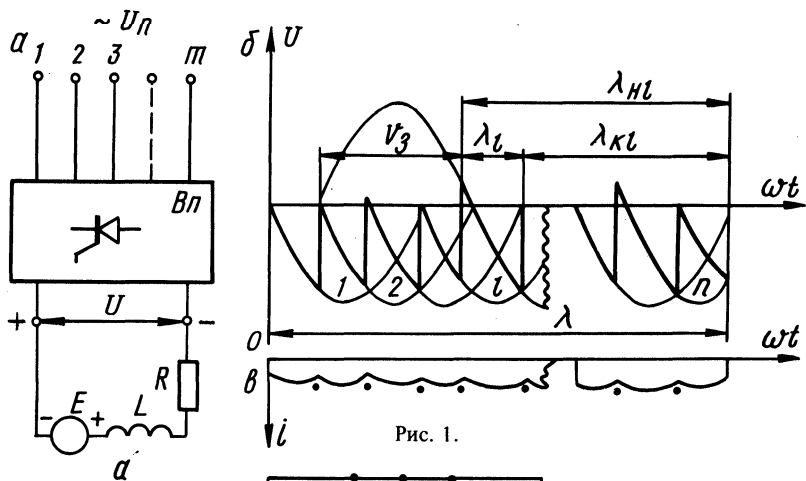
где $i_{n1}^* = \frac{i_{n1} R}{U_6}$ и $\varepsilon = \frac{E}{U_6}$ - относительные значения соответственно начального тока первого участка и противо-э.д.с. двигателя; U_6 - базовое напряжение (за U_6 принята амплитуда напряжения сети); $\theta = \arctg \frac{\omega L}{R}$; $a_1 = \frac{U_{m1}}{U_6}$ - коэффициент напряжения; U_{m1} - амплитуда синусоидального напряжения питания данного участка; ψ_{3l} - угол зажигания вентиля, обеспечивающего протекание тока данного участка (отсчитывается от начала синусоиды напряжения питания данного участка); λ_1 - длительность данного участка; λ_{k1} - величина угла от конца данного участка l до конца периода; λ_{n1} - величина угла от начала данного участка до конца периода.

Принимая $i_{n1}^* = 0$, получим уравнение граничной э.д.с. областей прерывистого и непрерывного тока

$$\varepsilon_{\text{гр}} = \frac{\cos \theta}{1 - \exp(-\lambda \operatorname{ctg} \theta)} \left[\sum_{l=1}^n a_l \sin(\psi_{3l} - \theta) \exp \times \exp(-\lambda_{n1} \operatorname{ctg} \theta) - \sum_{l=1}^n a_l \sin(\psi_{3l} + \lambda_1 - \theta) \exp(-\lambda_{k1} \operatorname{ctg} \theta) \right]. \quad (2)$$

В соответствии с выражением (6) [2] с учетом знака противо-э.д.с. двигателя относительное значение среднего тока преобразователя

$$i_{\text{cp}}^* = \varepsilon + \frac{1}{\lambda} \sum_{l=1}^n a_l \sin(\psi_{3l} + \frac{\lambda_1}{2}) \sin \frac{\lambda_1}{2}. \quad (3)$$



Из полученных обобщенных уравнений (2) и (3) можно получить уравнения для любой схемы выпрямителя, работающего в инверторном режиме.

На рис. 2, а представлена схема электропривода постоянного тока, обеспечивающего независимое реверсивное управление и регулирование скорости вращения нескольких электродвигателей [3]. Электропривод состоит из двух преобразователей и нескольких электродвигателей. Каждый из преобразователей представляет собой регулируемый (базовый) выпрямитель (БВ1, БВ2) и дополнительные управляемые вентили, включенные в виде параллельных цепей. Выпрямители работают с фиксированным углом регулирования, приблизительно равным 90 град. эл., что обеспечивает равенство положительных и отрицательных площадок кривых выпрямленного напряжения.

Напряжение, прикладываемое к двигателю, зависит от углов регулирования отдельных (Т1, Т4) и шунтирующих (Т2, Т3) вентилях. Линейные диаграммы напряжений и токов при работе преобразователя в инверторном режиме представлены на рис. 2, б, где u - напряжение сети; $i_{ш}$ и $i_{от}$ - соответственно ток шунтирующего и отдельного вентилях; φ - угол горения отдельного вентиля при положительном питающем напряжении; α - текущее значение угла.

За первый участок принимается участок работы шунтирующего вентиля, так как в начале этого участка ток имеет наименьшее значение. В соответствии с линейной диаграммой (рис. 2, б), подставляя в (2) и (3) $a_1=0$; $a_2=1$; $\vartheta_{32} = \pi - \varphi$; $\lambda_2 = \lambda_{н2} = \frac{\pi}{3} - \alpha + \varphi$; $\lambda_{к2}=0$, получим уравнения для определения $\epsilon_{гр}$ и $i_{ср}^*$;

$$\epsilon_{гр} = \frac{\cos \theta}{1 - \exp\left(-\frac{2\pi}{3} \operatorname{ctg} \theta\right)} \left[\sin(\varphi + \theta) \times \exp\left[\left(\alpha - \frac{\pi}{3} - \varphi\right) \operatorname{ctg} \theta\right] - \sin\left(\frac{4\pi}{3} - \alpha - \theta\right) \right]; \quad (4)$$

$$i_{ср}^* = \epsilon_{гр} - \frac{3}{2\pi} \left[\cos \varphi - \cos\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right) \right]. \quad (5)$$

По уравнениям (4) и (5) построены границы прерывистого тока (рис. 2, в) для $\varphi = 8$ град.эл. Результаты расчета подтверждают, что зона прерывистых токов в инверторном режи-

ме преобразователя с нулевыми вентилями уже, чем в выпрямительном режиме, кроме того, увеличение φ приводит к некоторому увеличению зоны прерывистых токов.

Л и т е р а т у р а

1. Анхимюк В.Л., Ильин О.П. Автоматическое управление электроприводами. Минск, 1965. 2. Анхимюк В.Л., Михеев Н.Н. Анализ электромагнитных процессов выпрямителя. — В сб.: Электроэнергетика, вып. 2. Минск, 1971. 3. Михеев Н.Н., Кривцов В.В., Раткевич Е.П. Вентильный многодвигательный электропривод. Авт. свид. № 485534. — Бюл. изобрет., 1975, № 35.

УДК 621.314.26

В.Г.Черномашенцев, канд.техн.наук,
В.А.Пацкевич, Ю.М.Зинин, канд.техн.наук,
А.М.Уржумсков

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ ТИРИСТОРНЫЙ ИНВЕРТОР

Тиристорные преобразователи частоты нашли наиболее широкое применение в установках для индукционного нагрева металлов [1, 2, 3]. Данные преобразователи имеют значительное разнообразие схем и рабочих режимов, причем на повышенных частотах большое распространение получили различные модификации схем последовательных инверторов [1].

Нагрузкой такого инвертора в электротермических установках обычно служит колебательный контур, образованный индуктивностью нагревателя и компенсирующей емкостью. В ходе технологического процесса параметры нагрузочного колебательного контура изменяются в широких пределах [1, 2], что сопровождается изменением режима работы тиристорного преобразователя, потребляемой мощности, а также структуры эквивалентной электрической схемы замещения. Отмеченное предьявляет особые требования к схеме инвертора.

В Белорусском институте инженеров железнодорожного транспорта проведено исследование высокочастотного стабилизированного тиристорного инвертора (рис. 1) [5], способного работать на нагрузку, изменяющуюся в широких пределах. Данная нагрузка Z_n является скомпенсированной и состоит из параллельного колебательного контура.

Работу инвертора в установившемся режиме рассмотрим с момента включения тиристоров $V2$ и $V3$. По цепи, образованной включившимися тиристорами, коммутирующим конденсатором C_K , нагрузкой Z_H , коммутирующим дросселем L_O и разделительным конденсатором C_P , начинает протекать ток. Параметры отмеченной цепи выбраны такими, что форма тока близка к синусоидальной. После прохождения током своего максимального значения полярность напряжения на коммутирующем дросселе меняет знак и в момент, когда напряжение между анодом диода $V1$ и минусовой шиной превысит величину входного напряжения U_d , включается диод $V1$. Включение последнего ограничивает возрастание напряжения на тиристорах инвертора при изменении параметров нагрузки. Данное ограни-

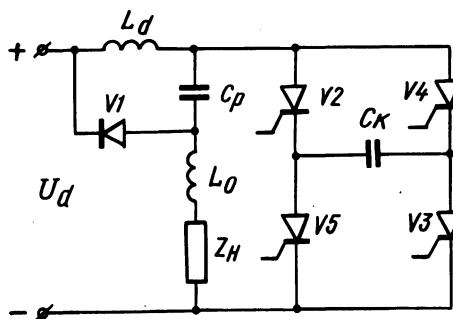


Рис. 1. Схема стабилизированного тиристорного инвертора.

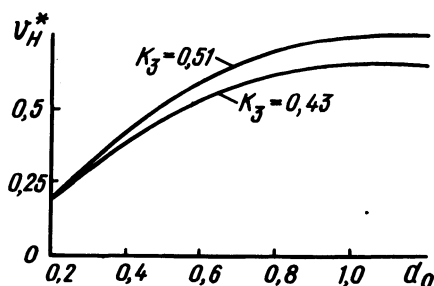
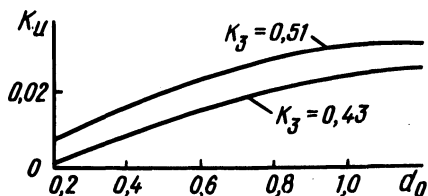


Рис. 2. Зависимость $U_H^* = f(d_0)$ при различных коэффициентах заполнения.

Рис. 3. Зависимость $k_H = f(d_0)$ при различных коэффициентах заполнения.



чение равно приблизительно удвоенному напряжению источника питания. С нарастанием тока через диод $V1$ падает до нуля ток тиристоров и они выключаются, сам же диод выключится как только иссякнет запас электромагнитной энергии в коммутирующем дросселе L_O . Затем с некоторой паузой включаются тиристоры $V4$, $V5$ и в схеме инвертора протекают процессы, уже описанные выше.

За время горения пары тиристоров и паузы в колебательном контуре нагрузки Z_H формируется период тока нагрузки. Таким образом, за полный период работы тиристоров инвертора в нагрузке формируются два периода колебательного тока. Данный инвертор может быть выполнен и в многоячейковом исполнении, что повышает предельную частоту инвертирования.

С целью решения вопроса о пригодности рассмотренной схемы в преобразователях частоты для индукционного нагрева металлов был проведен анализ электромагнитных процессов, протекающих в инверторе. Для этого была разработана программа расчета на ЭЦВМ, в которой решались системы дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в схемах замещения на отдельных интервалах работы, в пределах каждого из которых условия остаются неизменными. Полная автоматизация расчета обеспечивается тем, что расчет ведется с момента пуска инвертора, а начальные условия для каждого последующего расчетного интервала вводятся в программу исходя из конечных значений соответствующих величин предыдущего интервала.

Для получения обобщенных результатов, пригодных для инверторов данного типа, анализ электромагнитных процессов проведен с использованием относительных единиц [4, 6].

В процессе расчета изменением эквивалентного сопротивления нагрузки $r_{\text{экв.н}}$ затухание инвертора d_0 изменялось в пределах от 0,2 до 1,2. При этом фиксировались такие важные и необходимые для расчета тиристорного преобразователя величины, как напряжение на нагрузке, входной ток инвертора, время, предоставляемое на восстановление управляемости тиристоров, коэффициент использования тиристоров на мощности $k_{\text{и}}$, равный отношению входной мощности к учетверенному произведению амплитудных значений тока и напряжения на тиристорах.

Известно [4, 6], что на свойства инвертора большое влияние оказывает коэффициент заполнения k_3 , равный отношению частоты нагрузочного тока к удвоенной частоте собственных колебаний инверторного контура. В расчете данной схемы k_3 изменялся в пределах 0,4...0,7 путем изменения коммутирующих элементов преобразователя. Кроме того, варьированием параметров нагрузочного колебательного контура изменялась величина его затухания d_n в пределах 0,05...0,2.

На рис. 2 приведена зависимость относительной величины напряжения на нагрузке U_n^* при изменении d_0 от 0,2 до 1,2

и различных коэффициентах заполнения k_3 . Анализ полученных зависимостей показывает, что с увеличением d_0 и k_3 величина U_H^* несколько возрастает. Однако в исследуемом диапазоне изменения d_0 напряжение на нагрузке не превышает U_d . При отключении стабилизирующего диода величина U_H возрастает до $2,5 U_d$. Следовательно, наличие стабилизирующего диода приводит к ограничению напряжений на элементах схемы инвертора в широком диапазоне изменения d_0 , что позволяет успешно применять данный инвертор для индукционного нагрева и плавки металлов.

Расчет электромагнитных процессов показал, что при изменении d_0 в тех же пределах ($d_0 = 0,2 \dots 1,2$) относительная величина максимального напряжения $U_{T,max}^*$, прикладываемого к тиристорам, изменяется в 1,5 раза. В отмеченном диапазоне изменения d_0 величина $U_{T,max}^*$ не более чем в 2,2 раза превышает U_d . Если отключить стабилизирующий диод, то, согласно [1], при тех же условиях $U_{T,max}$ изменяется в пределах от 2 до 5.

Вопрос о рациональном использовании тиристоров в той или иной схеме целесообразно решать путем сравнения коэффициентов использования $k_{\text{и}}$ тиристоров по мощности. На рис. 3 показаны зависимости данных коэффициентов исследуемого инвертора от параметра d_0 при различных значениях k_3 . Сравнивая $k_{\text{и}}$ данного инвертора с широко используемым на практике инвертором со встречно-параллельными диодами [1, 4, 6], можно заключить на основании [6], что при $d_0 = 0,8 \dots 1,2$ они имеют примерно равный $k_{\text{и}}$, а при $d_0 = 0,2 \dots 0,4$ у исследуемого инвертора $k_{\text{и}}$ выше, чем у инвертора со встречно-параллельными диодами.

В результате проведенных расчетов определены оптимальные величины d_0 , k_3 , d_H с учетом таких факторов, как время, предоставляемое на восстановление управляющих свойств тиристоров, величины скорости изменения тока и напряжения на тиристорах, входная мощность, коэффициент использования тиристоров по мощности. На основании оптимальных значений d_0 , k_3 , d_H по заданным величинам - номинальной мощности преобразователя, напряжению источника питания U_d , выходной частоте нагрузки определяются параметры коммутирующих элементов силовой схемы. С увеличением частоты инвертирования оптимальные значения d_0 и k_3 уменьшаются без изменения d_H .

Полученные результаты были использованы на практике при расчете тиристорных преобразователей частоты от 2,5 до 44 кГц и внедренных в промышленную эксплуатацию Белорусским институтом инженеров железнодорожного транспорта на ряде заводов страны. Преобразователь на 2,5 кГц имеет следующие данные: мощность 250 кВт; $d = 0,8$; $k = 0,51$; $d_n = 0,2$; $C = 4C_k$; $L_d = 10L$ (рис.1), охлаждение ^з водяное, ^нгабариты 900 x 1500 x 2500 мм.

Л и т е р а т у р а

1. Беркович Е.И. и др. Тиристорные преобразователи высокой частоты. Л., 1973.
2. Промышленное применение токов высокой частоты. - Труды ВНИИ ТВЧ, вып. 7. М.-Л., 1966.
3. Применение токов высокой частоты в электротермии. Под ред. А.Е.Слухоцкого. Л., 1973.
4. Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева металлов. - Труды УАИ, вып. 91. Уфа, 1976.
5. Кацнельсон С.М. и др. Последовательный тиристорный инвертор. Авт.свид. № 547019. - Бюл.изобрет. 1977, №6.
6. Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева металлов. - Труды УАИ, вып. 22. Уфа, 1971.

УДК 621.3.052.33

Э.В.Купчинова,
Т.Т.Розум, канд.техн.наук

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Условия симметрии в трехфазных цепях с изолированной нейтралью могут не выполняться в силу различных причин. В результате происходит смещение потенциала нейтральной точки и приемника относительно центра треугольника линейных напряжений, и симметрия фазных напряжений нарушается.

Рассмотрим простую методику графоаналитического исследования режимов работы трехфазной цепи. Класс решаемых задач ограничен случаем, когда

$$Z_A = mze^{j\varphi}; m = \text{var}; \varphi = \text{var}; Z_B = Z_C = ze^{j\alpha} = \text{const.}$$

Выражение напряжения смещения нейтрали [1]

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

после подстановки комплексных э.д.с. и проводимостей, несложных преобразований и нормирования приводится к виду

$$\dot{U}'_{nN} = \frac{\dot{U}_{nN}}{E} = \frac{e^{-j\varphi} - me^{-j\alpha}}{e^{-j\varphi} + 2me^{-j\alpha}} \quad (1)$$

Для дальнейшего анализа вводим величину $\Delta = \varphi - \alpha$. Подставляя в (1) вместо угла α разность $\varphi - \Delta$, получим

$$\dot{U}'_{nN} = \frac{1 - me^{-j\Delta}}{1 + 2me^{-j\Delta}} \quad (2)$$

На основании (2) можно построить на комплексной плоскости два семейства кривых, параметрами которых будут значения переменных $m = \frac{Z_A}{Z}$ и $\Delta = \varphi - \alpha$. Для упрощения построений целесообразно преобразовать (2), выделив вещественную и мнимую части:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Re} \dot{U}'_{nN} &= \frac{1 - 2m^2 + m \cos \Delta}{1 + 4m^2 + 4m \cos \Delta}; \\ \operatorname{Im} \dot{U}'_{nN} &= - \frac{3m \sin \Delta}{1 + 4m^2 + 4m \cos \Delta} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

На рис. 1 по формулам (3) построены названные семейства кривых: первое удовлетворяет условию $m = \text{const}$, а второе — $\Delta = \text{const}$. Кривые $m = \text{const}$ представляют окружности, центры которых расположены на вещественной оси. При $m = 0,5$ окружности вырождаются в прямую линию, параллельную мнимой оси и проходящую через точку 0,25. Когда Δ стремится к $\pm 180^\circ$, точка n уходит в бесконечность, т.е.

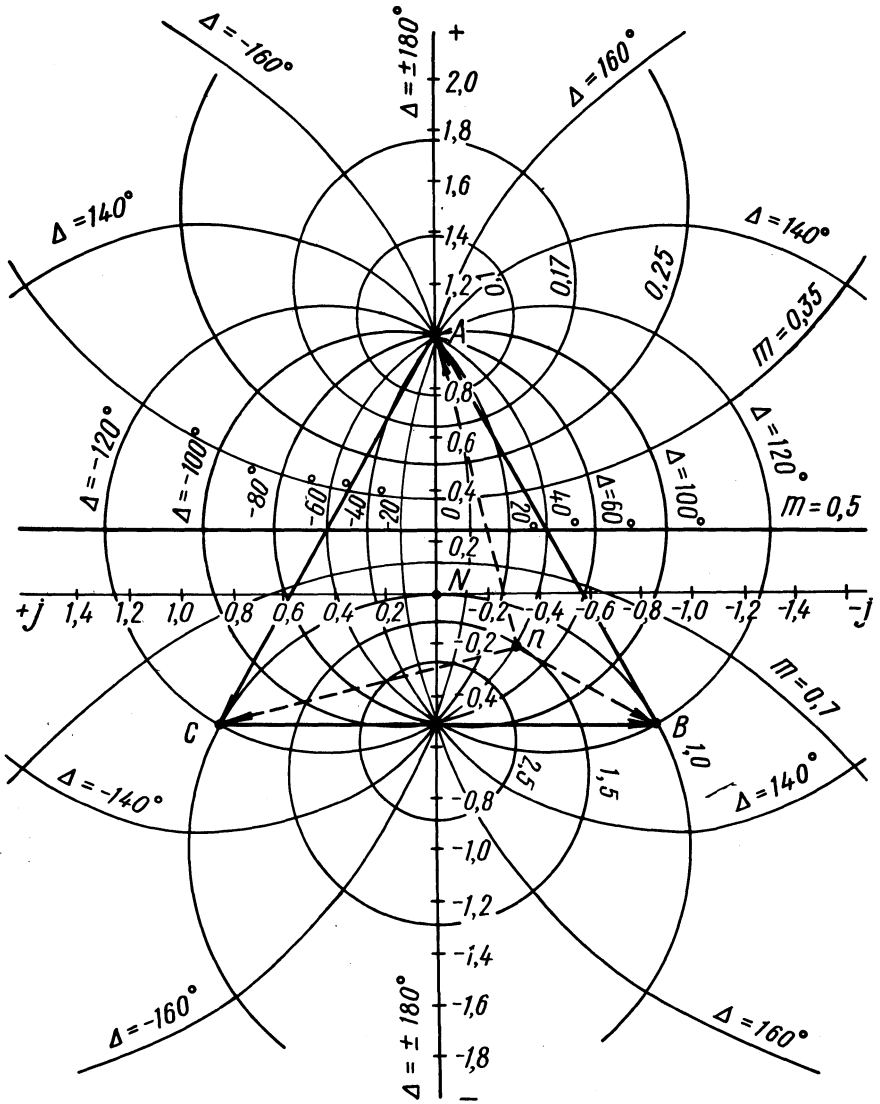


Рис. 1.

U_{nN} и фазные напряжения приобретают бесконечно большие значения. В реальных цепях условие $\Delta = 180^\circ$ недостижимо, поэтому все напряжения конечны, хотя и испытывают резкое увеличение. Физически оно объясняется резонансными явлениями.

Характер кривых $m = \text{const}$ свидетельствует, что они могут быть описаны на комплексной плоскости уравнением окружности

$$\dot{U}'_{nN}(m, \Delta) = K(m) + R(m) e^{jf(\Delta)}. \quad (4)$$

Траектории семейства кривых $\Delta = \text{const}$ также являются окружностями, центры которых расположены на прямой, проходящей через точку $+0,25$ параллельно мнимой оси. С возрастанием Δ радиусы окружностей увеличиваются. Кривые $\Delta = \text{const}$ описываются уравнением

$$\dot{U}'_{nN}(m, \Delta) = \dot{K}_1(\Delta) + R_1(\Delta) e^{jf_1(\Delta)}. \quad (5)$$

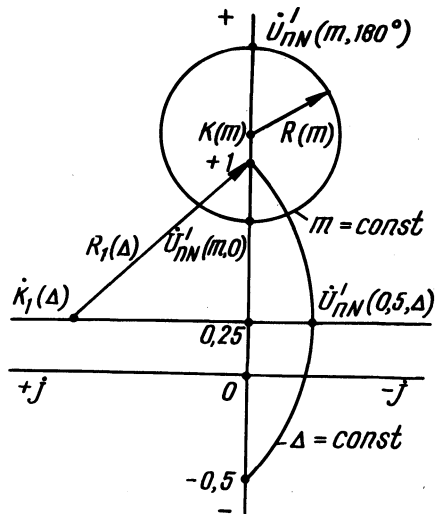


Рис. 2.

Для определения $K(m)$, $R(m)$, $\dot{K}_1(\Delta)$ и $R_1(\Delta)$ применен искусственный прием, основанный на геометрических соотношениях между радиусом окружности, координатой ее центра и координатами характерных точек траектории.

На рис. 2 показаны две траектории, соответствующие некоторым значениям m и Δ , и отмечены точки с координатами $\dot{U}'_{nN}(m, 0)$, $\dot{U}'_{nN}(m, 180^\circ)$ и $\dot{U}'_{nN}(0, 5; \Delta)$. Искомые величины связаны с координатами точек соотношениями

$$\left. \begin{aligned} K(m) &= \frac{\dot{U}'_{nN}(m, 180^\circ) + \dot{U}'_{nN}(m, 0)}{2} ; \\ R(m) &= \frac{|\dot{U}'_{nN}(m, 180^\circ) - \dot{U}'_{nN}(m, 0)|}{2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

для окружностей семейства $m = \text{const}$ и

$$\left. \begin{aligned} |\text{Im } K_1(\Delta) - \text{Im } \dot{U}'_{nN}(0, 5; \Delta)| &= R_1(\Delta); [\text{Im } K_1(\Delta)]^2 + 0,75^2 = \\ &= R_1^2(\Delta) - \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

для окружностей семейства $\Delta = \text{const}$. Решая последние соотношения относительно искомых величин, получим

$$\left. \begin{aligned} \text{Im } K_1(\Delta) &= \frac{\text{Im}^2 \dot{U}'_{nN}(0, 5; \Delta) - 0,5625}{2 \text{Im } \dot{U}'_{nN}(0, 5; \Delta)} ; \\ R_1(\Delta) &= \frac{\text{Im}^2 \dot{U}'_{nN}(0, 5; \Delta) + 0,5625}{2 |\text{Im } \dot{U}'_{nN}(0, 5; \Delta)|} . \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

В соответствии с (2)

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}'_{nN}(m, 0) &= \frac{1-m}{1+2m}; \quad \dot{U}'_{nN}(m, 180^\circ) = \frac{1+m}{1-2m}; \\ \text{Im } \dot{U}'_{nN}(0, 5; \Delta) &= - \frac{0,75 \sin \Delta}{1 + \cos \Delta} . \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Подставляя выражения (9) в (6) и (8), получим формулы для определения радиусов окружностей и их центров:

$$R(m) = \frac{3m}{|1-4m^2|}; \quad K(m) = \frac{1+2m^2}{1-4m^2}; \quad (10)$$

$$R_1(\Delta) = \frac{0,75}{|\sin \Delta|}; \quad \text{Im } K_1(\Delta) = 0,75 \text{ ctg} \Delta. \quad (11)$$

Формулы (10) и (11) позволяют построить оба семейства окружностей с желаемым шагом параметров m и Δ , пользуясь лишь циркулем.

Приведенная диаграмма (рис. 1) дает наглядное представление о совместном влиянии m и Δ на режим работы несимметричной трехфазной цепи, у которой в двух фазах включены одинаковые сопротивления. Диаграмма позволяет аналитический расчет заменить графическим, сводящимся к измерению необходимых расстояний. В качестве примера рассмотрим решение следующей задачи:

$$U_{\text{л}} = 500 \text{ В}; Z_{\text{А}} = 150 e^{j30^\circ} \text{ Ом}; Z_{\text{В}} = Z_{\text{С}} = 100 e^{-j30^\circ} \text{ Ом}.$$

Нейтральная точка n (рис. 1) определяется пересечением ок-

ружностей $m = \frac{Z_{\text{А}}}{Z_{\text{В}}} = 1,5$ и $\Delta = \varphi - \alpha = 60^\circ$. Измеряя рас-

стояния от точки n до вершин и центра треугольника линейных напряжений, находим нормированные значения фазных напряжений и напряжения смещения нейтрали:

$$U_{\text{а}}' = 1,27; U_{\text{б}}' = 0,64; U_{\text{с}}' = 1,21; U_{\text{нN}}' = 0,375.$$

Абсолютные значения напряжений:

$$U_{\text{а}} = U_{\text{а}}' \frac{U_{\text{л}}}{3} = 366,7 \text{ В}; U_{\text{б}} = U_{\text{б}}' \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = 184,8 \text{ В};$$

$$U_{\text{с}} = U_{\text{с}}' \frac{U_{\text{л}}}{3} = 349,3 \text{ В}; U_{\text{нN}} = U_{\text{нN}}' \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = 108,3 \text{ В};$$

Л и т е р а т у р а

1. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Ч. 1, М., 1970.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ АППРОКСИМАЦИИ
КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА-
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Ранее [1] была показана возможность использования трансформатора с витым пространственным магнитопроводом в качестве преобразователя частоты (рис. 1). При соединении вторичных обмоток w_2 в открытый треугольник выходное напряжение преобразователя изменяется с утроенной частотой. Аналитический расчет такого устройства начинается с выбора аппроксимирующего выражения для кривой намагничивания. Обычно коэффициенты аппроксимации определяют по методу выбранных точек. Существуют различные рекомендации по выбору этих точек, но они не позволяют устранить основной недостаток этого метода, заключающийся в получении неоднозначного решения. Для повышения точности аппроксимации в [2] предложен метод определения коэффициентов аппроксимации кривой намагничивания по гармоническому составу кривой тока, который получил дальнейшее развитие в работах [3,4].

Нами предлагается метод определения коэффициентов аппроксимации кривой намагничивания по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания преобразователя (рис.1).

Аппроксимируем кривую намагничивания выражением гиперболического синуса

$$H = \alpha \operatorname{sh} \beta B. \quad (1)$$

При разомкнутой вторичной цепи в напряженности магнитного поля трансформатора-преобразователя частоты отсутствуют гармоники кратные трем

$$H_{3m} = 0. \quad (2)$$

Согласно [5] амплитуда третьей гармоники магнитной индукции

$$B_{3m} = -\frac{0,35}{\beta} + 0,25 B_{1m}. \quad (3)$$

Из выражения (3) легко определить коэффициент β .

Воспользовавшись разложением гиперболического синуса от синусоидально изменяющегося аргумента в ряд Фурье [6], пренебрегая высшими гармониками тока вследствие их малости, находим

$$H_{3m} = 2\alpha I_3(\beta B_{1m}), \quad (4)$$

где $I_3(\beta B_{1m})$ - модифицированная функция Бесселя.

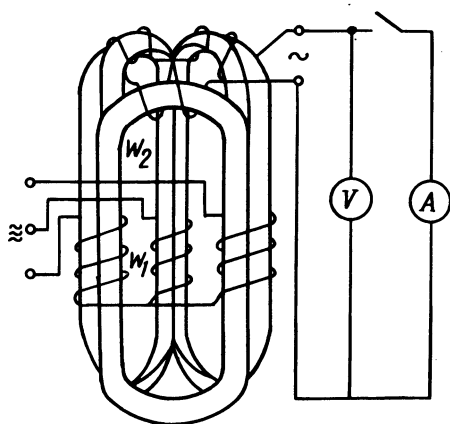


Рис. 1. Трансформатор-преобразователь частоты.

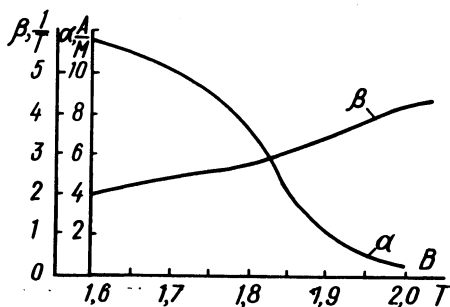


Рис. 2. Зависимость коэффициентов аппроксимации от амплитуды расчетной индукции.

Решая (4) относительно α , получим

$$\alpha = \frac{H_{3m}}{2I_3(\beta B_{1m})}, \quad (5)$$

где H_{3m} определяется из опыта короткого замыкания.

На рис. 2 приведены зависимости коэффициентов аппроксимирующего выражения в функции B_{mp} - амплитуды расчетной индукции трансформатора-преобразователя частоты.

Л и т е р а т у р а

1. Сончик Л.И., Мехедко В.Ф., Гладышевский П.С. Трансформатор-преобразователь частоты с витым пространственным магнитопроводом. - В сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики, вып. 4. Минск, 1977. 2. Бладыко В.М., Бараш Н.В., Мазуренко А.А. Определение коэффициентов аппроксимации кривой намагничивания по гармоническому составу кривой тока. - Изв. вузов СССР. Энергетика, 1969, № 11. 3. Бладыко В.М., Мазуренко А.А., Деметьев О.А. Определение коэффициентов аппроксимации динамических петель гистерезиса по гармоническому спектру кривой тока. - Изв. вузов СССР. Энергетика, 1972, № 3. 4. Кузьменко Н.И., Гольдштейн Е.И. К вопросу об аппроксимации основной характеристики намагничивания. - Изв. вузов СССР. Электромеханика, 1977, № 7. 5. Бладыко В.М., Згировский М.З., Ильин В.М. Применение упрощенного метода гармонического анализа к расчету электрических цепей со сталью. - Изв. вузов СССР. Энергетика, 1963, № 5. 6. Бессонов Л.А. Нелинейные электрические цепи. М., 1969.

УДК 621.311.4

В.С.Лившиц, канд.техн.наук

ПАРЦИАЛЬНЫЙ ПРИНЦИП В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Применение парциального принципа для определения расчетного максимума нагрузки группы разнородных электроприемников предложено проф. Г.М.Каяловым [1]. В данной статье парциальный подход рассматривается на основе общей теории суммирования разнородных электрических нагрузок [2], что приводит к другому, чем в [1], обоснованию и выражению парциальных нагрузок.

Согласно [3] и [4] расчетный коэффициент спроса группы электроприемников одной категории выражается формулой

$$K_{\text{ср}} = k_{\text{ио}} + \frac{\beta}{\sqrt{n_{\text{э}}}} (\sigma_{\text{ки}} + k_{\text{с}}), \quad (1)$$

где $k_{\text{ио}}$ и $\sigma_{\text{ки}}$ - математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение распределения коэффициентов использова-

ния мощности электроприемников k_i ; k_{σ} - коэффициент рассеяния нагрузки электроприемников, равный отношению среднего квадратического отклонения нагрузки σ к номинальной мощности P_n : n_{ε} - эффективное число электроприемников; β - коэффициент, характеризующий надежность K_{cp} (при надежности 0,95 $\beta = 1,65$).

В [2] показано, что группа электроприемников номинальной мощностью P_n , состоящая из N подгрупп разных категорий ($P_n = \sum_{i=1}^N P_{ni}$), может быть заменена эквивалентным образом группой электроприемников одной (эквивалентной) категории с показателями

$$k_{иоз} = \frac{\sum k_{иоi} P_{ni}}{\sum P_{ni}}, \quad \sigma_{киэ} \approx \frac{\sum \sigma_{киi} P_{ni}}{\sum P_{ni}}; \quad (2)$$

$$k_{\varepsilon} = \frac{\sum k_{\sigma i} P_{ni}}{\sum P_{ni}}.$$

Коэффициент спроса группы выражаются через эти показатели формулой (1):

$$K_{cp} = \frac{\sum k_{иоi} P_{ni}}{P_n} + \frac{\beta}{\sqrt{n_{\varepsilon}}} \left(\frac{\sum \sigma_{киi} P_{ni}}{P_n} + \frac{\sum k_{\sigma i} P_{ni}}{P_n} \right) =$$

$$= \frac{1}{P_n} \sum_{i=1}^N \left[k_{иоi} + \frac{\beta}{\sqrt{n_{\varepsilon}}} (\sigma_{киi} + k_{\sigma i}) \right] P_{ni}. \quad (3)$$

Под знаком суммы в (3) содержатся показатели электроприемников одной категории. Структура выражения в квадратных скобках показывает, что оно представляет собой коэффициент спроса $K'_{срi}$ i -й подгруппы электроприемников, но определенный не при фактическом эффективном числе электроприемников подгруппы $n_{\varepsilon i}$, а при общем n_{ε} группы в целом. Ана-

логия, проведенная ниже, позволяет назвать $K'_{срi}$ парциальным коэффициентом спроса i -й подгруппы, а расчетный максимум нагрузки

$$P_{mi}^I = K_{срi}^I P_{ni} \quad (4)$$

- парциальным максимумом i -й подгруппы.

Из выражения (3) с учетом (4) вытекает, что

$$P_M = K_{ср} P_n = \sum_1^N K_{срi}^I P_{ni} = \sum_1^N P_{mi}^I, \quad (5)$$

т.е. расчетный максимум нагрузки группы электроприемников разных категорий равен сумме парциальных максимумов входящих в нее подгрупп одной категории.

Интересно отметить, что полученные результаты позволяют провести аналогию между парциальными принципами в теории электрических нагрузок и физической теории смеси идеальных газов.

Аналогами являются: а) максимум нагрузки группы электроприемников P_M и давление смеси газов P ; б) парциальный максимум нагрузки i -ой подгруппы P_{mi}^I и парциальное давление i -го газа P_i ; в) номинальная мощность подгруппы P_{ni} и масса i -го газа в грамм-молекулах (молях) M_i ; г) эффективное число электроприемников всей группы $n_{\text{э}}$ и объем смеси газов V .

Аналогия проявляется в сходстве основных определений и законов. Парциальным давлением i -го газа в смеси называется давление, которое оказал бы газ, если бы при массе M_i молей занял объем всей смеси. Парциальный максимум нагрузки i -ой подгруппы представляет собой максимум, который подгруппа имела бы, если бы при номинальной мощности P_{ni} она обладала эффективным числом электроприемников всей группы $n_{\text{э}}$ (имела "объем" всей группы). Формула (5), выражающая максимум нагрузки группы через парциальные максимумы подгрупп, повторяет закон Дальтона: давление смеси идеальных газов равно сумме их парциальных давлений.

Парциальные максимумы нагрузки, применяемые в [1], отличаются тем, что определяются при различном для разных подгрупп приведенном числе электроприемников. Обоснованное в статье иное определение парциальных максимумов подгрупп (при одинаковом числе электроприемников, равном $n_{\text{э}}$ всей группы) представляется более стройным теоретически (вследствие указанной аналогии) и удобным для практических расчетов.

Л и т е р а т у р а

1. Волобринский С.Д. и др. Электрические нагрузки промышленных предприятий. М., 1964. 2. Лившиц В.С. Основы теории суммирования электрических нагрузок разнородных промышленных электроприемников. - Изв. вузов СССР. Электромеханика, 1970, № 8. 3. Князевский Б.А., Лившиц В.С. Закон распределения и расчетное значение коэффициента спроса группы промышленных электроприемников. - Электричество, 1969, № 9. 4. Лившиц В.С. Универсальные расчетные кривые для коэффициента максимума нагрузки группы промышленных электроприемников. - Изв. вузов СССР. Энергетика, 1969, № 12.

УДК 621.3.013.62.001.24

В.М.Бладыко, канд.техн.наук,
В.И.Можар

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ЕМКОСТИ ФИЛЬТРОВ ФЕРРОРЕЗОНАНСНОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Феррорезонансные стабилизаторы напряжения благодаря простоте устройства, практической безынерционности и высокой эксплуатационной надежности находят широкое применение в народном хозяйстве. Недостатком стабилизаторов данного типа является несинусоидальность формы кривой выходного напряжения. В то же время ряд современных производств предъявляет повышенные требования к форме кривой выходного напряжения стабилизаторов. Так, например, коэффициент гармоник стабилизаторов, питающих линии настройки телевизоров, не должен превышать 5%, а коэффициент гармоник стабилизаторов, питающих установки регулировки и поверки электрических счетчиков, не должен превышать 2%.

Улучшение формы кривой выходного напряжения стабилизаторов может быть достигнуто с помощью фильтров, настроенных на высшие гармоники и включенных параллельно нелинейной индуктивности (рис. 1) (как правило, достаточно установить фильтры на 3-ю, 5-ю и 7-ю гармоники). При этом

$$C_3 + C_5 + C_7 + \dots + C_k + \dots C_n = C, \quad (1)$$

где C - емкость конденсаторов феррорезонансного стабилизатора без фильтров (считается известной); $C_3, C_5, \dots, C_k, \dots$

C_n - емкости конденсаторов фильтров, настроенных соответственно на 3-ю, 5-ю, ..., к-ю, ..., n-ю гармоники.

Определим емкости конденсаторов фильтров, которые обеспечат минимальный коэффициент гармоник. Для этого воспользуемся приближенными формулами для расчета высших гармоник напряжения в относительных единицах [1]:

$$U_3 = \frac{A_3}{Y_3}, U_5 = \frac{A_5}{Y_5}, \dots, U_k = \frac{A_k}{Y_k}, \dots, U_n = \frac{A_n}{Y_n}; \quad (2)$$

$$A_3 = 2I_3(B_1), A_5 = 2I_5(B_1), \dots, A_k = 2I_k(B_1), \dots, A_n = 2I_n(B_1), \quad (3)$$

где $Y_k = Q_k k C_k$; Y_k - проводимость в относительных единицах цепи фильтра, настроенного на к-ю гармонику; Q_k - добротность цепи к-го фильтра; B_1 - первая гармоника магнитной индукции нелинейной индуктивности в относительных единицах; $I_k(B_1)$ - модифицированная функция Бесселя от аргумента B_1 .

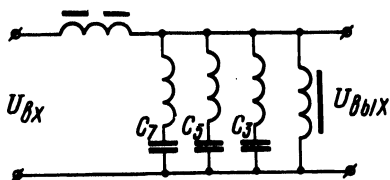


Рис. 1. Принципиальная схема феррорезонансного стабилизатора напряжения с фильтрами.

Коэффициент гармоник с учетом (2) и (3)

$$K_{\Gamma} = \frac{1}{U_1} \sqrt{U_3^2 + U_5^2 + \dots + U_k^2 + \dots + U_n^2} =$$

$$= \frac{1}{U_1} \sqrt{\left(\frac{A_3}{3Q_3 C_3}\right)^2 + \left(\frac{A_5}{5Q_5 C_5}\right)^2 + \dots + \left(\frac{A_k}{kQ_k C_k}\right)^2 + \dots +} \quad (4)$$

$$\dots \rightarrow \frac{A_n}{nQ_n C_n} + \left(\frac{A_n}{nQ_n C_n} \right)^2 \quad (4)$$

где $C_n = C - C_3 - C_5 - \dots - C_k - \dots - C_{n-1}$.

Коэффициент гармоник будет минимальным при условии

$$\frac{\partial K_r}{\partial C_k} = 0,$$

откуда получим

$$\frac{C_k}{C_n} = \sqrt[3]{\left(\frac{nQ_n A_k}{kQ_k A_n} \right)^2}.$$

Следовательно, можно записать систему из n -уравнений с n неизвестными

$$\left. \begin{aligned} \frac{C_3}{C_n} &= \sqrt[3]{\left(\frac{nQ_n A_3}{3Q_3 A_n} \right)^2}; \\ \frac{C_5}{C_n} &= \sqrt[3]{\left(\frac{nQ_n A_5}{5Q_5 A_n} \right)^2}; \\ \frac{C_{n-1}}{C_n} &= \sqrt[3]{\left(\frac{nQ_n A_{n-1}}{(n-1)Q_{n-1} A_n} \right)^2}; \\ C_3 + C_5 + \dots + C_n &= C, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

решая которую найдем емкости конденсаторов фильтров, которые обеспечивают минимальный коэффициент гармоник (не более 2%).

Л и т е р а т у р а

1. Bladyko W.M., Moshar W.I. Die iterative Methode bei der harmonischen Analyse in Ferroresonanzkreisen. XX. Intern.-Wiss. Koll. TH Pirmenau, 1975, N 2.

УДК 621.3.054; 621.316.13

Л.И.Демиденко,
В.В.Яцкевич, канд.техн.наук

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ УСТРОЙСТВА С УПРАВЛЯЕМЫМ РЕАКТОРОМ

Установка продольной компенсации (УПК), нагруженная управляемым реактором с вращающимся магнитным полем, используется в качестве средства местного регулирования напряжения [1]. Сравним ее эффект повышения напряжения с эффектом шунтовой конденсаторной батареи (ШКБ).

Будучи включена в распределительную сеть, ШКБ повышает напряжение на величину

$$\Delta U = x_1 I_c = x_1 \frac{Q_c}{U}, \quad (1)$$

где x_1 - индуктивное сопротивление предвключенной передачи; U , I_c , Q_c - напряжение, ток и реактивная мощность ШКБ (фазные).

Повышение напряжения на единицу установленной (номинальной) реактивной мощности Q_n , или эффект повышения напряжения в соответствии с [2], измеряемой в В/кВАр или 1/кАр, можно выразить через x_1 и номинальное фазное U_n :

$$\frac{\Delta U}{Q_y} = \frac{x_1 Q_y}{U Q_y} = \frac{x_1}{U_y} \frac{U_y}{U_y}. \quad (2)$$

С увеличением нагрузки напряжение в точке подключения ШКБ снижается, и пропорционально ему снижается ее регулирующий эффект. Это основной недостаток ШКБ как средства регулирования напряжения.

Если батареи конденсаторов той же установленной мощности включить последовательно в линию (УПК), то повышение напряжения от индуктивного тока нагрузки $I_{1нг}$ и реактивного тока управляемого реактора $I_{ур}$ (активной составляющей тока реактора, обусловленной потерями энергии в самом реакторе, пренебрегаем) составит

$$\Delta U = (x_1 - x_y)(I_{1лг} + I_{ур}). \quad (3)$$

Принимая мощность управляемого реактора равной мощности УПК, получим повышение напряжения на единицу установленной реактивной мощности

$$\frac{\Delta U}{Q_y} = \frac{1}{2} \frac{x_1}{U_H} (1 - k_k)(3\beta_1 \sin \varphi + \beta_2), \quad (4)$$

где $k_k = x_c / x_1$ - степень компенсации; $\beta_1 = \frac{I}{I_H}$, $\beta_2 = \frac{I_{ур}}{I_{ур.н}}$ коэффициенты загрузки электропередачи и реактора; I_H , $I_{ур.н}$ - номинальные токи электропередачи и реактора.

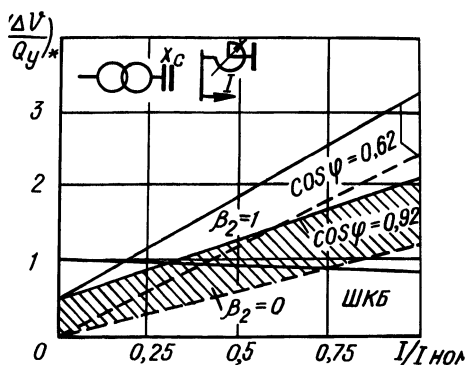


Рис. 1. Эффект повышения напряжения устройства с управляемым реактором.

Номинальное напряжение УПК принято равным $0,33U_H$ шунтовой батареи из расчета, что потеря напряжения некомпенсированной электропередачи составляла 10%, а степень компенсации $k_k = 3$ (максимально допустимая для распределительных сетей 10 кВ).

Эффект повышения напряжения УПК с управляемым реактором, как следует из (4), при заданной степени компенсации и характера нагрузки зависит от коэффициентов β_1 и β_2 . Принимая эффект повышения напряжения шунтовой батареи x_1/U_H за единицу, построим в относительных единицах график изменения $(\Delta U/Q_y)$ в зависимости от β_1 (рис. 1) для двух предельных значений $\cos \varphi = 0,92; 0,62$, характерных для зимнего и летнего максимумов нагрузки [2] при степени компенсации k . В отличие от ШКБ, повышающей напряжение в режиме минимальных нагрузок и снижающей выдачу реактивной мощности в часы максимума нагрузки, ценное качество установки заключается в том, что при уменьшении нагрузки эффект повышения напряжения также уменьшается и при $\beta_1 = 0$ исчезает совсем. Изменяя ток возбуждения загрузки управляемого реактора ($\beta_2 = 0 \dots 1$), можно регулировать эффект повышения напряжения в достаточно широких пределах, отмеченных на рис. 1 для $\cos \varphi = 0,92$ заштрихованной зоной.

Л и т е р а т у р а

1. Либкинд М.С. и др. Устройство с управляемым реактором для регулирования напряжения в распределительной сети 10 кВ. - Электрические станции, 1972, № 5. 2. Карпов Ф.Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях. М., 1975.

УДК 621.313.333

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

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИРИСТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ НАБРОСЕ НАГРУЗКИ

При синтезе и анализе замкнутых систем электропривода постоянного тока с управляемым выпрямителем, работающим на якорь электродвигателя, обычно пренебрегают дискретностью выпрямителя и считают систему линейной [1].

Между тем одной из особенностей электропривода постоянного тока с управляемым выпрямителем является невозможность управления напряжением преобразователя в интервале времени между моментом открывания очередного вентиля и

моментом, соответствующим углу естественного открывания последующего вентиля. Приложение возмущающего воздействия по нагрузке в эти интервалы будет вызывать изменение скорости двигателя, в то время как напряжение на якоре двигателя в эти интервалы не управляется.

В общем случае э.д.с. двигателя

$$e = e_3 - \Delta e,$$

где e_3 - э.д.с. якоря двигателя, создаваемая под действием задающего воздействия пульсирующей э.д.с. преобразователя; Δe - изменение э.д.с. якоря двигателя, вызванное набросом нагрузки.

При непрерывном токе якоря в интервале времени после открывания очередного вентиля

$$\Delta e = \frac{1 + T_p}{1 + T_M p + T_M T_p^2} I_c R.$$

Откуда

$$\frac{\Delta e}{\Delta e_{уст}} = \frac{1 + T_p}{1 + T_M p + T_M T_p^2}, \quad (1)$$

где T , T_M - электромагнитная постоянная времени якорной цепи и электромеханическая постоянная времени привода; I_c - статическая составляющая тока якоря, R - сопротивление якорной цепи; $\Delta e_{уст}$ - установившееся значение отклонения э.д.с. двигателя в разомкнутой системе, вызванное набросом нагрузки.

Решение уравнения (1) при $\xi < 1$

$$\frac{\Delta e}{\Delta e_{уст}} = 1 - \frac{1}{\cos \varphi} e^{-\frac{t}{2T}} \cos \left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{2\xi} \frac{t}{T} + \varphi \right), \quad (2)$$

где $\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_M}{T}}$ - коэффициент демпфирования колебаний;

$$\varphi = \arccos 2\xi \sqrt{1-\xi^2}.$$

При $\xi > 1$

$$\frac{\Delta e}{\Delta e_{уст}} = 1 + \frac{1}{p_1 - p_2} (p_2^2 e^{p_1 t} - p_1^2 e^{p_2 t}), \quad (3)$$

где $p_{1,2} = \frac{1}{2T} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{1}{\xi^2}} \right]$ - корни характеристического уравнения.

Если момент приложения возмущающего воздействия при работе в режиме прерывистого тока приходится на бестоковый интервал, то, полагая $M_d = 0$ в уравнении $M_d = M_c + J \frac{d\omega}{dt}$ и решая его, получим

$$\frac{\Delta e}{\Delta e_{уст}} = \frac{t}{T_M} = \frac{T}{T_M} \frac{t}{T} = \frac{1}{4\xi^2} \frac{t}{T_M}. \quad (4)$$

На рис. 1 представлены зависимости $\frac{\Delta e}{\Delta e_{уст}} = f\left(\frac{t}{T}\right)$ при различных значениях ξ для непрерывного режима (кривые линии) и для прерывистого режима при приложении возмущающего воздействия в бестоковый период (прямые линии). Из анализа приведенных зависимостей видно, что возможное отклонение скорости двигателя от момента приложения возмущающего воздействия до момента изменения регулятором э.д.с. преобразователя зависит от постоянных времени T и T_M , а также от максимально возможного интервала неуправляемости выпрямителя, который определяется пульсностью схемы выпрямления и способом управления выпрямителем.

Учитывая, что за базовую величину по оси ординат взято установившееся отклонение э.д.с. двигателя в разомкнутой системе, можно сделать вывод, что возможное отклонение скорости на первом интервале после приложения возмущающего воздействия может во много раз превысить установившееся отклонение скорости в замкнутой системе $\Delta e_{уст.з}$ независимо от действия регулятора, так как

$$\Delta e_{уст.з} = \frac{\Delta e_{уст}}{1 + \gamma \beta},$$

где $\gamma \beta$ - результирующий коэффициент усиления системы.

Наибольшее отклонение скорости может иметь место при малых значениях T_M . При этом в случае жестких требований к качеству переходного процесса по возмущающему воздействию целесообразно применить схему выпрямления с большим числом пульсов выпрямленного напряжения. Предварительную оценку возможности применения той или иной схемы выпрямления при заданных требованиях к качеству переходного процесса при возмущающем воздействии можно произвести по приведенным зависимостям. Из рис. 1 видно, что подобную оценку поведения системы можно произвести приблизительно по выражению (4), так как зависимости

$$\frac{\Delta e}{\Delta e_{уст}} = f\left(\frac{t}{T}\right) \text{ по}$$

(3) при малых значениях t близки к тем же зависимостям по (2), (3).

Например, анализируя работу двигателя постоянного тока с $T_M = 0,01$ с от трехфазного выпрямителя с нулевым выводом

при угле регулирования $\alpha = 60$ град. эл., находим, что максимально возможный интервал неуправляемости $t_{\max} = 0,0035$ с. Тогда $\frac{\Delta e}{\Delta e_{уст}} \approx \frac{t}{T_M} = \frac{0,0035}{0,01} = 0,35$. Если

ли $(1 + \gamma\beta) = 100$, то $\frac{\Delta e}{\Delta e_{уст}} = 35$.

Л и т е р а т у р а

1. Анхимюк В.Л., Ильин О.П. Проектирование систем управления электроприводами. Минск, 1971.

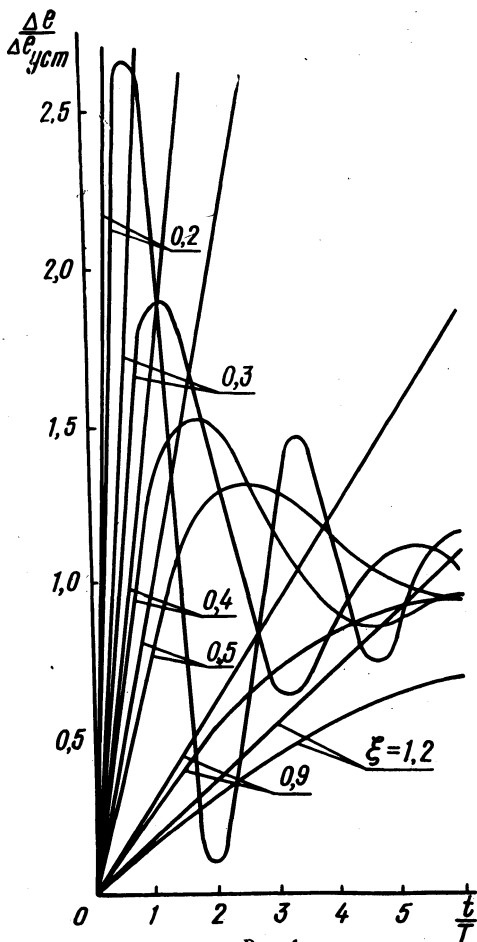


Рис. 1.

Л. П. Падалко, канд. техн. наук,
А. И. Баранников, Н. Н. Никольская

ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ
МЕЖДУ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ ПРИ ТЕКУЩЕМ
ПЛАНИРОВАНИИ ОСНОВНОГО ПРОИЗВОДСТВА
ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

В настоящее время в ряде энергосистем большое внимание уделяется разработке автоматизированной системы технико-экономического планирования. Главной задачей этой системы является распределение производства энергии между электростанциями системы. Несмотря на практическую актуальность этой задачи, она на сегодняшний день не имеет удовлетворительного решения. Это объясняется, с одной стороны, сложностью рассматриваемой задачи, а с другой – огромной трудоемкостью расчетов при использовании традиционного подхода на основе множественных расчетов режимов работы энергосистемы для характерных суточных периодов года. В этой связи возникает необходимость применения такого подхода к решению данной задачи, который был бы адекватен используемой исходной информации и практически приемлем для принятия плановых решений.

Общая постановка задачи выглядит следующим образом. Предполагается заданным суммарное производство электроэнергии (или отпуск с шин) на электростанциях системы Э, размеры отпуска тепловой энергии от каждой ТЭЦ за рассматриваемый плановый период. Требуется определить оптимальное распределение производства электроэнергии между электростанциями и на основе этого величину полного и удельного расходов топлива по каждой станции и в целом по системе.

Схема решения задачи включает два этапа. На первом этапе определяется выработка электроэнергии на каждой ТЭЦ по теплофикационному режиму ΣT_i . Возможны два подхода к решению этой задачи. Первый подход – это оптимизационный. При этом рассматривается задача оптимального распределения отпуска тепла между агрегатами ТЭЦ, формулируемая в самом общем виде как

$$\max \sum_{i=1}^m \varphi_i(Q_i^{\text{п}}, Q_i^{\text{тф}}); \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m Q_i^{\text{п}} + Q_{\text{РОУ}}^{\text{п}} = Q_0^{\text{п}}; \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m Q_i^{\text{тф}} + Q_{\text{ПК}}^{\text{тф}} = Q_0^{\text{тф}}; \quad (3)$$

$$Q_{i \min}^{\text{п}} \leq Q_i^{\text{п}} \leq Q_{i \max}^{\text{п}}; \quad (4)$$

$$Q_{i \min}^{\text{тф}} \leq Q_i^{\text{тф}} \leq Q_{i \max}^{\text{тф}}. \quad (5)$$

Здесь $\varphi_i(Q_i^{\text{п}}, Q_i^{\text{тф}})$ - зависимость теплофикационной электрической энергии по i -му агрегату ТЭЦ от размеров отпуска тепловой энергии на производственные ($Q_i^{\text{п}}$) и теплофикационные ($Q_i^{\text{тф}}$) нужды; $Q_{\text{РОУ}}^{\text{п}}$ - отпуск тепла на производственные нужды через РОУ; $Q_{\text{ПК}}^{\text{тф}}$ - отпуск тепла на теплофикационные нужды от пиковых котлов; $Q_0^{\text{п}}$, $Q_0^{\text{тф}}$ - заданные размеры суммарного отпуска тепловой энергии на производственные и теплофикационные нужды.

Условия (4) и (5) означают ограничения на размеры отпуска тепла от агрегатов ТЭЦ.

Вследствие того, что в рассматриваемой задаче требуется не разработка технологического задания по режиму тепловой загрузки оборудования в течение рассматриваемого планового периода, а объективная оценка величины производства электроэнергии по теплофикационному режиму, это дает возможность использовать для решения задачи второй подход - статистический. Этот подход требует выявления тенденции изменения размера теплофикационной выработки и факторов, оказывающих влияние на этот показатель.

Задача, решаемая на втором этапе, формулируется в следующем виде:

$$\min \sum_{j=1}^n f_j(\Theta_j); \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n \Theta_j = \Theta - \sum_{i=1}^m \Theta_i^r; \quad (7)$$

$$\min \Theta_j \leq \Theta_j \leq \max \Theta_j; \quad (8)$$

$$B_j^{\min} \leq f_j(\Theta_j) \leq B_j^{\max}. \quad (9)$$

Здесь функция $f_j(\Theta_j)$ выражает зависимость расхода топлива на j -й электростанции от величины производства электроэнергии на ней. Ограничения (7) характеризуют условие баланса, а неравенства (8) и (9) – ограничения соответственно по выработке энергии и расходу топлива.

Ввиду аддитивности целевой функции для решения задачи может быть использован метод динамического программирования. Рекуррентное соотношение Беллмана представляется в виде

$$h_k(\Theta) = \min \left\{ h_{k-1}(\Theta - \Theta_k) + f_k(\Theta_k) \right\}.$$

Укрупненная математическая модель (6) – (9) сформулирована при ряде упрощающих предположений. В частности, не учитывается влияние потерь энергии в сетях на результат распределения мощности и энергии между электростанциями. Этот фактор особенно может быть существенным в режиме повышенных нагрузок системы, когда относительные приросты отдельных станций с учетом потерь, определяемые по формуле

$$\varepsilon_i^l = \frac{\varepsilon_i(P_i)}{1 - \sigma_i(P_1, \dots, P_i, \dots, P_n)},$$

достигают своих максимальных значений. Это обстоятельство требует корректировки расходных характеристик отдельных станций, особенно в зоне максимальных значений выработки энергии Θ_j с тем, чтобы ограничить уровень загрузки этих станций. Необходимость корректировки указанных характеристик может оказаться необходимой также из-за наличия ограничений по пропускной способности электрической сети.

Весьма важен учет в модели реального режима работы отдельных электростанций. Например, режим работы высокоэкономичных КЭС, найденный на основе решения задачи (6)–(9), может оказаться близким к базовому, хотя, как известно, в настоящее время мощность КЭС используется для покрытия не только базовой, но и частично полупиковой и пиковой частей суточного графика электрических нагрузок. Для исключения такого решения следует в алгоритм расчета включить контроль допустимого режима работы отдельных электростанций. Для этого следует на основе анализа статистики работы КЭС за интересующий период времени выявить число часов использования h_y ее располагаемой мощности. Зная среднюю располагаемую мощность станции за рассчитываемый плановый период $N_{расп}$, определяемую по выражению

$$N_{расп} = \frac{\sum_{i=1}^k N_i^{ед} t_i^p}{t_{кал}},$$

можно исключить из расчета те значения выработки станции Θ , которые не удовлетворяют условию $\Theta \leq N_{расп} (h_y + \epsilon)$. Здесь $N_i^{ед}$ – единичная мощность i -го агрегата; t_i^p – время нахождения i -го агрегата в работе и резерве; $t_{кал}$ – календарное время; ϵ – малая величина.

Наряду с оптимизационным подходом в решению задачи может быть использован также статистический подход. Производство электроэнергии в системе за какой-либо период можно представить в виде многомерного вектора Θ_t , компонентами которого являются значения производства электроэнергии на отдельных электростанциях $\Theta_t = (\Theta_{1t}, \Theta_{2t}, \dots, \Theta_{nt})$. Зная значения вектора Θ_t для времени t , предшествующего плановому периоду ($t = 1, 2, \dots, \tau$), можно поставить задачу прогнозирования многомерного временного ряда. Вследствие коррелированности значений Θ_{it} для решения рассматриваемой задачи целесообразно использование факторного анализа. По данным Θ_t , для ряда лет строится корреляционная матрица R размером $n \times n$, где n – число электростанций. Далее по матрице R строится матрица факторных нагрузок A , которая связывает векторы Θ с векторами F некоррелированных факторов

$$\Theta^* = A F. \quad (10)$$

Параметры Θ_{it}^* предварительно нормируются по формуле

$$\Theta_{it}^* = \frac{\Theta_{it} - m_{\Theta_i}}{\sigma_{\Theta_i}}, \quad (11)$$

где m_{Θ_i} , σ_{Θ_i} - оценки соответственно математического ожидания и среднеквадратического отклонения параметра Θ_i .

Если для определения некоррелированных факторов вектора F используется метод главных компонент, то число факторов равно числу элементов вектора Θ и факторы определяются из выражения

$$F = A^{-1} \Theta^*. \quad (12)$$

При использовании метода главных факторов размерность вектора F оказывается меньше размерности вектора Θ_t и для определения главных факторов применяются соответствующие методы факторного анализа

$$F = B \Theta^*,$$

где B - матрица обратного факторного отображения.

Так как главные факторы некоррелированы, их можно прогнозировать независимо друг от друга. В результате прогноз $\Theta_{\zeta+1}^*$ вычисляется как

$$\Theta_{\zeta+1}^* = B F_{\zeta+1},$$

а из выражения (11) определяется прогноз $\Theta_{\zeta+1}$.

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

УРАВНЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА В АСУ ТП ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА ГЛАВНЫХ ЭЖЕКТОРОВ НА ЭКОНОМИЧНОСТЬ ТУРБОУСТАНОВКИ Т-250-240

Одним из важных элементов современных турбоустановок являются главные эжекторы конденсаторов. В процессе эксплуатации имеется возможность изменять режим эжекторов — количество работающих эжекторов и источники рабочего пара (деаэратор, коллектор собственных нужд и пр.). Причем для каждого из условий работы конденсационной установки имеется оптимальный режим эжекторов [1].

Расчеты показывают, что отклонение от оптимального режима эжекторов приводит в ряде случаев к существенному перерасходу тепла. Однако в эксплуатации контролю этого фактора, как правило, уделяется недостаточное внимание. В определенной мере это объясняется отсутствием оперативного поступления персоналу необходимой информации.

В АСУ ТП реализуется автоматический сбор и обработка информации, что позволяет организовать оперативный контроль режима главных эжекторов. Эта задача решается посредством структурных характеристик тепловой схемы X_1^{ϕ} , X_1^H , которые являются дискретными величинами и отражают соответственно фактический и нормативный режимы эжекторов.

Методы получения структурных характеристик и их учет для определения перерасходов тепла на турбоустановку при отклонении фактических условий ее работы от нормативных изложены в работе [2].

Перерасход тепла определяется с помощью характеристик X_1^{ϕ} и X_1^H по выражению

$$\Delta Q = \sum_{i=1}^n (X_1^{\phi} - X_1^H) \delta Q_1,$$

где δQ_1 — перерасход тепла при i -м режиме эжекторной установки.

В работе [3] приведена методика расчета перерасходов тепла для теплофикационных турбоустановок, в соответствии с которой перерасход δQ_1 определяется по формуле

$$\delta Q_1 = (1 - q_k) \delta N_1,$$

где q_k — относительный прирост расхода тепла конденсационного цикла турбоустановки; δN_1 — изменение электрической мощности, вырабатываемой турбоустановкой при l -м режиме эжекторов, в сравнении с базовым вариантом (в качестве базового варианта принимается режим установки с одним работающим эжектором на деаэраторном паре).

Изменения электрической мощности δN_1 должны определяться при условии, что расход тепла в конденсатор $Q_k = idem$. В данной статье приведены результаты разработки уравнений по определению изменений мощности δN_1 для турбоустановки Т-250-240.

Турбоустановка Т-250-240 имеет три главных эжектора типа ЭП-3-3, которые можно использовать при следующих режимах: $l = 1, 2, 3$ — работают соответственно один, два и три эжектора на деаэраторном паре; $l = 4$ — работает один эжектор на деаэраторном паре и один на паре из коллектора собственных нужд; $l = 5, 6, 7$ — работают соответственно два, три и один эжектор на паре из коллектора собственных нужд.

При определении величин δN_1 рассматриваются энергетические изменения, связанные с вытеснением отборов, питающих паром ПНД № 1 и 2, с отклонением расхода отборного пара на деаэратор, с отклонением давления пара в конденсаторе (вследствие изменения состава работающих эжекторов) от нормы. При этом изменение мощности турбоустановки при работе двух эжекторов на деаэраторном паре равно

$$\delta N_2 = [K_j N_j - (1 - \Pi) \delta i_{\ominus}^{\ominus} \ominus_2^{\ominus} - \Pi \delta i_{\ominus}^{\ominus} \ominus_1^{\ominus}] D_{\ominus}^{\ominus} + \Delta N_k,$$

где \ominus_1, \ominus_2 — коэффициенты удельной электрической выработки отборов, питающих ПНД № 1 и 2; D_{\ominus}^{\ominus} и $\delta i_{\ominus}^{\ominus}$ — расход пара из деаэратора на один эжектор и теплоиспользование пара в холодильниках эжекторов; Π — признак работы ПНД-1, равный нулю при отключенном подогревателе; N_j — использованное теплопадение пара j -го отбора, питающего деаэратор; K_j — коэффициент пересчета расхода пара, поступающего на эжекторы, в расход пара, поступающего в деаэратор,

$$K_j = \frac{i_d - \bar{t}_d}{i_j - \bar{t}_d} .$$

Здесь i_d, i_j и \bar{t}_d — энтальпии пара в деаэраторе, в j -м отборе, питающем деаэратор, и питательной воды после него; ΔN_K — изменение мощности турбины вследствие изменения давления пара в конденсаторе при изменении состава работающих эжекторов

$$\Delta N_K = \Delta N_K^D + \Delta N_K^H ,$$

где $\Delta N_K^D = f(D_K \Delta P_K)$ — изменение мощности турбоустановки при постоянном расходе пара в конденсатор (определяется по уравнению, аппроксимирующему универсальную кривую поправок на вакуум); ΔN_K^H — изменение внутренней мощности турбоустановки вследствие изменения расхода пара в конденсатор при соблюдении условия $Q_K = \text{idem}$:

$$\Delta N_K^H = n D_K \frac{\Delta i_K - \Delta \bar{t}_K}{t'_K - \bar{t}'_K} ,$$

где i'_K, \bar{t}'_K — энтальпии пара и конденсата в конденсаторе; D_K — расход пара в конденсатор; n — удельная внутренняя мощность, вырабатываемая 1 кг пара, проходящего через всю турбину; $\Delta i_K, \Delta \bar{t}_K$ — изменение энтальпии пара и конденсата в конденсаторе при изменении давления P_K . Изменение давления пара в конденсаторе ΔP_K , обусловливаемое изменением количества работающих эжекторов, равно

$$\Delta P_K = \frac{m-1}{m} \beta a G_B ,$$

где a — угловой коэффициент рабочей характеристики эжекторной группы; β — коэффициент пересчета изменения дав-

ления пара на всасе эжекторов в давление пара в конденсаторе; m — количество работающих эжекторов; G_B — присосы воздуха в конденсатор.

При включении трех эжекторов на деаэрационном паре увеличивается расход пара на эжекторную группу на величину $2D_{\text{э}}^{\text{э}}$. Кроме того, изменение давления пара в конденсатор приводит к соответствующему изменению мощности турбины на величину $\Delta N_K'$. Поправка к мощности турбины $\delta N_{\text{э}}$ при этом равна

$$\delta N_{\text{э}} = [K_j H_j - (1-\Pi) \delta i_{\text{э}}^{\text{э}} \cdot \text{э}_2 - \Pi \delta i_{\text{э}}^{\text{э}} \cdot \text{э}_1] 2D_{\text{э}}^{\text{э}} + \Delta N_K'$$

При питании одного эжектора паром из деаэратора, а второго из коллектора собственных нужд изменение мощности турбоустановки определяется по выражению

$$\delta N_4 = [H_K - (1-\Pi) \delta i_{\text{э}}^K \cdot \text{э}_2 - \Pi \delta i_{\text{э}}^K \cdot \text{э}_1] D_{\text{э}}^K + \Delta N_K,$$

где H_K — использованное в турбине теплопадение пара отбора, питающего коллектор собственных нужд; $D_{\text{э}}^K$ и $\delta i_{\text{э}}^K$ — расход пара на эжектор и теплоиспользование пара в холодильнике эжектора при питании его из коллектора собственных нужд.

При работе двух эжекторов на паре из коллектора собственных нужд

$$\delta N_5 = 2\delta N_4 - \delta N_2.$$

При работе трех эжекторов на паре из коллектора собственных нужд

$$\delta N_6 = 3\delta N_4 - \delta N_2 - 0,5\Delta N_K'.$$

При работе одного эжектора на паре из коллектора собственных нужд

$$\delta N_7 = \delta N_4 - \delta N_2.$$

С помощью разработанных уравнений определены изменения удельного расхода тепла на выработку электроэнергии турбоустановки при различных режимах эжекторов. В табл. 1 показаны некоторые из результатов расчетов.

Таблица 1. Изменение удельного расхода тепла на выработку электроэнергии турбоустановки Т-250-240 при различных режимах главных эжекторов, %

Присосы воздуха, кг/ч	Нагрузка в от-носительных единицах	Номер режима эжекторной группы						
		1	2	3	4	5	6	7
30	$N = 1,0$ $Q_T = 0,5$	0,06 0	0,01	0,02	0,03	0,05	0,08	
	$N = 0,5$ $Q_T = 0,75$	0,26 0,02 0		0,06	0,10	0,10	0,29	
120	$N = 1,0$ $Q_T = 0,5$	0,48 0,1 0		0,12	0,13	0,05	0,50	
	$N = 0,5$ $Q_T = 0,75$	1,53 0,35 0		0,39	0,42	0,12	1,57	

Рассмотренные уравнения реализуются при разработке задачи оперативного контроля экономичности в АСУ ТП энергоблоков 250 МВт ТЭЦ-21 Мосэнерго.

Л и т е р а т у р а

1. Щербич В.И. Показатели качества работы конденсационной установки в системе автоматизированного анализа экономичности турбоагрегата. -- Электрические станции, 1975, № 2. 2. Щербич В.И., Минков В.А. Характеристики структуры тепловой схемы турбоагрегата при автоматизированном анализе экономичности его работы. -- Теплоэнергетика, 1974, № 5. 3. Щербич В.И., Минков В.А. Расчет поправок к расходу тепла при анализе экономичности турбины. -- В сб.: Теплоэнергетика, вып. 2. Минск, 1972.

УДК 518.512.3:621.311

В.В. Павловец

АЛГОРИТМ ПРОГРАММЫ ВЫВОДА РИСУНКА СИЛОВОГО ПОЛЯ НА АЦПУ

При решении на ЭВМ задач, связанных с расчетом силовых электромагнитных, температурных, детонационных полей, полей усталостных напряжений для исследователей наряду с численными значениями силового поля в определенном сечении представляет интерес и общая картина поля.

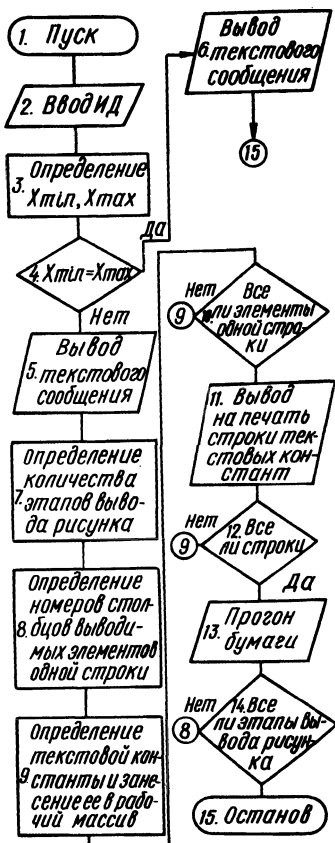


Рис. 1. Блок-схема программы вывода рисунка силового поля на АЦПУ.

Разработана программа вывода рисунка силового поля на широкоую печать ЭВМ. В качестве исходных данных для программы служит двумерный массив численных значений силового поля. Каждый элемент двумерного массива содержит характеристику силового поля в определенной точке пространства.

Весь интервал численных значений поля от минимального значения до максимального разбивается на 10 градаций. Каждая градация на рисунке представляется в виде одной из текстовых констант 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9: На рисунке каждое численное значение двумерного массива отображается одним символом текстовой константы.

Текстовая константа определяется по формуле

$$TK = \text{int} \left(10 \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \right),$$

где int -- функция усечения; X_{ij} -- численное значение элемента массива; X_{\min} -- минимальное значение двумерного массива; X_{\max} -- максимальное значение двумерного массива.

В программе используется одномерный рабочий массив размерностью 125.

Если количество столбцов двумерного массива больше 125, вывод рисунка осуществляется в несколько этапов.

Программа вывода рисунка силового поля реализована на алгоритмических языках автокод "Инженер" и "Фортран-1У" и включена в библиотеку программ ЭВМ "Минск-32" Белорусского политехнического института [1].

Время вывода рисунка двумерного массива 100×100 составляет 45 с.

На рис. 1 представлена блок-схема программы, реализованной на алгоритмическом языке "Фортран-1У".

Л и т е р а т у р а

1. Балацкова-Подольскова С.И., Булко И.М., Цагельский В.Н. Фортран ЭВМ "Минск-32". М., 1975.

УДК 621.316:681.142

Л.В. Ничипорович, канд. техн. наук,
А.Г. Ус, инженер

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Энергохозяйство современного промышленного предприятия состоит из нескольких источников питания, десятков и даже сотен трансформаторных подстанций, значительного количества другого электрооборудования, рассредоточенных на значительной территории. Управление такой системой на современном уровне организации производства требует использования математических методов и средств вычислительной техники. Все это в настоящее время воплощается и концентрируется в создании автоматизированных систем управления предприятия (АСУП). Придавая большое значение энергохозяйству промышленных предприятий в функционировании производства, приобретает актуальный вопрос об организации в АСУП подсистемы энергоиспользования (АСУЭ).

Основными функциями АСУП следует считать: 1. Централизованное оперативное управление режимом работы энергохозяйства. 2. Оптимизация режимов и показателей работы энергохозяйства. 3. Учет и контроль состояния, режимов и показателей работы энергохозяйства. 4. Анализ, планирование и развитие энергохозяйства.

Технической основой АСУП являются ЭВМ, средства сбора, передачи и отображения информации, эффективное использование которых во многом определяется качеством математического обеспечения. Первоочередной задачей разработки математического обеспечения является выявление и обоснование задач подсистемы.

Проведенное обследование промышленных предприятий машиностроительного профиля дало возможность выявить и классифицировать следующие задачи подсистемы АСУЭ.

Задачи первой группы.

1. Учет и контроль режимов и показателей работы энергопотребления. 2. Контроль и управление качеством энергии. 3. Расчет оптимальных режимов электрической сети. 4. Оптимальное управление режимами энергопотребления. 5. Расчет, контроль и управление надежностью системы электроснабжения. 6. Расчет токов коротких замыканий, уставок релейной защиты, устойчивости систем электроснабжения и т.п. 7. Периодическая отчетность по режимам и показателям энергопотребления.

Задачи второй группы.

1. Учет и контроль состояния элементов системы электроснабжения. 2. Учет и прогнозирование отказов энергооборудования. 3. Оптимальное планирование планово-предупредительных ремонтов. 4. Оптимизация и расчет материально-технического снабжения.

Задачи третьей группы.

1. Анализ, планирование и развитие системы энергоснабжения. 2. Организация и учет нормативной базы энергохозяйства. 3. Расчет затрат на энергию в себестоимости продукции. 4. Учет, анализ и контроль затрат в системе энергохозяйства.

Очередность и выбор решения тех или иных задач характеризуется как их важностью, так и наличием технических средств и математическим обеспечением.

Разработка вопросов построения и функционирования АСУЭ сталкивается с рядом трудностей, преодоление которых требует проведения широких научных исследований. В настоящее время такие исследования ведутся рядом научных и производственных организаций страны.

Так, в Белорусском политехническом институте ведутся работы по созданию математического обеспечения АСУЭ.

В настоящее время для ЭВМ "Минск-32" и ЕС-1020 разработаны программы комплексного расчета и анализа режима работы распределительной сети 6-10-20 кВ промышленного предприятия.

На базе построенной информационной модели сети программы дают возможность рассчитывать и выдавать на печать величину и загрузку линий, трансформаторов, потери мощности и энергии в сети, уровни напряжения, токи коротких замыканий и ряд других показателей. Использование их дает возможность более рационально планировать режимы работы электрической сети и тем самым повышать ее технико-экономические показатели.

УДК 62-83:621.9

Ю.Н. Петренко, канд.техн.наук,
Г.И. Гульков

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДУ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРОДОЛЬНО-ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ

Повышение эффективности металлообработки, в частности шлифования, является актуальной задачей машиностроения.

Одним из путей повышения производительности продольно-шлифовальных станков является обеспечение бесступенчатого регулирования частоты вращения шлифовального круга с целью поддержания постоянной скорости резания независимо от уменьшения диаметра круга в результате износа. При шлифовании деталей с постоянной скоростью резания удельная производительность шлифовального круга (отношение объемов сошлифованного металла к объему отработанного материала шлифовального круга) при других равных условиях возрастает в 1,35-1,5 раза по сравнению со шлифованием при неизменной частоте вращения круга [1]. Для поддержания постоянной скорости резания необходимо по мере уменьшения диаметра шли-

фовального круга увеличивать частоту вращения его в соответствии с выражением

$$n_k = \frac{60 V_{к.о}}{\pi D_k},$$

где $V_{к.о}$ — оптимальная скорость резания, м/с; D_k — текущее значение диаметра шлифовального круга, м.

Диапазон регулирования частоты вращения шлифовального круга определяется технологическими разновидностями работ. Для рассматриваемых станков характерным является обработка плоскостей направляющих станин, стыковых плоскостей корпусных деталей и плоскостей деталей типа плит. Обработка деталей производится периферией плоского и фасонно-заправленного круга и торцем чашечного круга. К технологическим разновидностям работ относится также правка шлифовального круга, необходимая для восстановления его режущих свойств или придания ему нужной геометрической формы.

Из условия максимальной производительности (окружная скорость резания (окружная скорость шлифовального круга) должна быть максимальной допустимой прочностью круга. Однако, учитывая необходимость обеспечения безопасности, скорость резания при работе периферией плоского и фасонно-заправленного круга ограничивается величиной 35 м/с. Частота вращения шлифовального круга с начальным диаметром $D_{к.н.} = 0,6$ м, соответствующая данной скорости $n_1 = 1115$ об/мин. В процессе шлифования и правки шлифовальный круг изнашивается. Допускается изменение размеров круга до $0,65 D_{к.н.}$, при этом скорость резания уменьшается на 35%. Для поддержания ее на первоначальном уровне (35 м/с) частота вращения круга должна быть увеличена до $n_2 = 1715$ об/мин. Скорость резания при работе торцем чашечного круга, по соображениям упомянутым выше, ограничивается величиной 22 м/с. При диаметре чашечного круга $D_{к.н.} = 0,15$ м этой скорости соответствует частота вращения $n_3 = 2803$ об/мин.

Правильный выбор режимов правки влияет не только на точность и шероховатость обработанной поверхности детали, производительность обработки, но и на расход шлифовальных кругов, стойкость правящего инструмента и себестоимость обработки. При правке методом обкатки инструментом из алмазозаменителей окружная скорость круга должна быть наимень-

шей, имеющейся на станке [2]. Она должна быть снижена по крайней мере в 3-4 раза по сравнению с $V_{к.о}$ и принята равной 10 м/с, что соответствует частоте вращения $n_4 = 318$ об/мин при правке плоского или фасонно-заправленного круга с $D_{к.н} = 0,6$ м.

Таким образом, для обеспечения всех технологических разновидностей работ, выполняемых на продольно-шлифовальном станке, необходим диапазон регулирования

$$D = \frac{n_{\text{макс}}}{n_{\text{мин}}} = \frac{n_1}{n_4} = \frac{2803}{318} = 8,8.$$

Для регулирования частоты вращения шлифовального круга наиболее целесообразно в настоящее время применение частотноуправляемого электропривода, что обусловлено следующими причинами. При работе продольно-шлифовального станка образуется легко взвешиваемая пыль, а также не исключено попадание в двигатель капель и брызг масла или смазочно-охлаждающей жидкости, что вызывает необходимость применения электродвигателя закрытого исполнения. Асинхронные двигатели закрытого исполнения имеют значительно меньшие габариты и массу по сравнению с двигателями постоянного тока, что очень важно в металлорежущих станках. Это обстоятельство приобретает еще большее значение, если учесть, что электродвигатель выполняется как одно целое со шлифовальной бабкой, т.е. в виде электрошпинделя.

Вследствие значительной инерции шлифовального круга время вращения шлифовального шпинделя по инерции может составлять 50-60 секунд и более, что требует применения торможения.

Качество поверхности шлифования предъявляет также повышенные требования к уровню вибрации электродвигателя и станка в целом.

На основании анализа режимов работы и с учетом конструктивных особенностей продольно-шлифовального станка определены требования к электроприводу главного движения:

1. Диапазон регулирования частоты вращения шлифовального круга $D = 9, (310 \div 2810)$ об/мин.

2. Автоматическое поддержание постоянной скорости резания при шлифовании периферией плоского и фасонно-заправленного круга.

3. Наличие электрического торможения.

4. Точность стабилизации частоты вращения шлифовального круга в пределах рабочей части естественной механической характеристики асинхронного двигателя.

5. Повышенные требования к точности изготовления элементов электродвигателя (подшипников, балансировке ротора и т.д.).

Указанные требования могут быть удовлетворены применением тиристорных преобразователей частоты типа ЭКТ, выпуск которых намечен на 1979 год Запорожским производственным объединением "Преобразователь".

Л и т е р а т у р а

1. Михелькевич В.Н. Автоматическое управление шлифованием. М., 1975. 2. Ящерицын П.И., Жалнерович Е.А. Шлифование металлов. Минск, 1970.

СОДЕРЖАНИЕ

Шпорта И.П., Трутаев В.И., Леонков А.М., Яковлев Б.В. Проблемы развития топливно-энергетического комплекса на современном этапе	3
---	---

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Качан А.Д., Леонков А.М., Сыропушинский В.М., Яковлев Б.В. Методика выбора оптимальных расчетных характеристик турбин типа ТК для АТЭЦ	12
--	----

Качан А.Д., Леонков А.М., Шишея П.Н. Оптимизация режима работы циркуляционной системы ТЭЦ с центральной насосной	16
--	----

Степанчук В.Ф., Романюк В.Н. Относительно уравнения состояния реального газа	22
--	----

Сбитнева М.М. Аэродинамический расчет канала рециркуляционной печи	24
--	----

Фатеев Г.А., Тарасевич Л.И. Экспериментальное моделирование взаимодействия саморегулируемого источника тепла с движущейся тепловой волной	30
---	----

Седнин В.А., Романюк В.Н. Анализ взаимодействия дисперсного адсорбента со стенками канала при пневмотранспорте	34
--	----

Пинчук Ю.В. Использование обратной сетевой воды для сбора избыточного тепла технологических установок	37
---	----

Сомова С.В., Несенчук А.П. Экстремумы критериев термодесорбционного процесса в потоке твердого адсорбента	39
---	----

Кравец В.Ф., Несенчук А.П., Малевич Ю.А. Нагревание цилиндрической садки конечных размеров в печах отделения горизонтально-ковочных машин (ГКМ)	42
---	----

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Поспелов Г.Е., Федин В.Т. Критерии подобия для анализа электрических параметров линий электропередачи с коаксиальными фазами 45
- Бережной А.В., Королюк В.Г. Необходимые условия стабилизации сверхпроводящих токопроводов из оплеток с технологическим покрытием 50
- Короткевич М.А., Травянский М.И. Анализ эффективности функционирования электросетевого предприятия с помощью факторного планирования эксперимента 52
- Файбисович В.А. Последовательное планирование некоторых нелинейных обратных регрессионных задач электроэнергетики 55
- Губанович А.Г. Влияние размеров поперечного сечения проводников на величину электродинамических усилий в лобовой части обмотки статора мощных турбогенераторов 57
- Пекелис В.Г., Розенберг А.Е. Инженерный метод нахождения оптимального варианта размещения шунтовых конденсаторных батарей 61
- Шапиро И.З. Планирование потерь энергии и мероприятия по их снижению в электрических сетях энергосистем 64
- Калентионюк Е.В. Оценка технико-экономической эффективности разгрузочной автоматики энергосистемы 66
- Ничипорович Л.В., Филянович Л.П. Факторно-кластерная модель определения потерь энергии в электрических распределительных сетях 68
- Сыч Н.М., Широкин С.П. Эквивалентирование режимов сети по потерям электроэнергии 70
- Норейко М.М. Перерасход топлива и снижение мощности в энергосистеме при выводе агрегата в ремонт 73

Сергей И.И. Аналитическое решение статики гибких шин распределительных устройств с учетом гирлянд изоляторов .75

Ступак И.А. Методический подход к оценке показателей надежности криогенных кабельных линий 81

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Петренко Ю.Н., Самыков Е.П. Модернизация электропривода периодической подачи 84

Шафранский В.И., Боровой Б.В. Интегральный показатель влияния упругих связей на переходный процесс в электроприводе 87

Ползик П.В. Синтез автоматической системы управления с дискретной информацией отклонения 91

Ильин О.П., Примщиц П.П. Синтез нестационарных следящих систем с эталонной моделью 95

Лapidус А.И. Тиристорная схема торможения асинхронного двигателя 98

Сидоров В.Г. Функциональный формирователь обратно пропорциональной зависимости 102

Михеев Н.Н., Раткевич Е.П. Анализ электромагнитных процессов преобразователя в инверторном режиме 106

Черномашенцев В.Г., Пацкевич В.А., Зинин Ю.М., Уржумсков А.М. Высокочастотный стабилизированный тиристорный инвертор 110

Купчинова Э.В., Розум Т.Т. Исследование несимметричных режимов трехфазной цепи с изолированной нейтралью 114

Бладыко В.М., Сончик Л.И. Определение коэффициентов аппроксимации кривой намагничивания трансформатора-преобразователя частоты 120

Лившиц В.С. Парциальный принцип в промышленных электрических нагрузках 122

Бладыко В.М., Можар В.И. Расчет оптимальной емкости фильтров феррорезонансного стабилизатора напряжения .. 125

Демиденко Л.И., Яцкевич В.В. Об эффективности повышения напряжения устройства с управляемым реактором . 128

Михеев Н.Н., Раткевич Е.П., Сацкевич В.Н. Динамические свойства тиристорного электропривода постоянного тока при набросе нагрузки 130

ЭКОНОМИКА И АСУ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Падалко Л.П., Баранников А.И., Никольская Н.Н. Оптимальное распределение производства энергии между электростанциями при текущем планировании основного производства энергосистемы 134

Баубель Л.А., Щербич В.И. Уравнения для анализа в АСУ ТП влияния режима главных эжекторов на экономичность турбоустановки Т-250-240 139

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

Павловец В.В. Алгоритм программы вывода рисунка силового поля на АЦПУ 144

Ничипорович Л.В., Ус А.Г. К вопросу построения автоматизированной системы энергоиспользования промышленного предприятия 145

Петренко Ю.Н., Гульков Г.И. Анализ режимов работы и требования к электроприводу главного движения продольно-шлифовальных станков 147

НАУЧНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

В ы п у с к 6

Редактор Г.В. Вагабова
Худож. редактор А.Г. Звонарев
Техн. редактор Л.И. Жук
Мл. редакторы Л.А. Косенкова, И.В.Бирюкова
Корректоры Н.И.Бондаренко, З.Б.Боборыко
График Н.В.Журавлева
Оператор М.К.Борисова

ИБ 692

Подписано к печати 15.01.79. АТ 09003. Формат 60x90¹/16.
Бумага офсет. Офсет. печать. Усл.-печ.л.10,5. Уч.-изд.л.8,76.
Изд. № 78-99. Тираж 450 экз. Зак. 5268. Цена 1 р.40 к.

Издательство "Вышэйшая школа" Государственного комитета
та Белорусской ССР по делам издательств, полиграфии и книж-
ной торговли. 220048. Минск, Парковая магистраль, 11.

Типография "Победа" Государственного комитета Белорус-
ской ССР по делам издательств, полиграфии и книжной торгов-
ли. Молодечно, Привокзальный пер., 11.

РЕФЕРАТЫ

УДК 620.9:621.09:311.22:697.3.003

Проблемы развития топливно-энергетического комплекса на современном этапе. Шпорта И.П., Трутаев В.И., Яковлев Б.В., Леонков А.М. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 3--11.

Происходящие изменения в топливно-энергетическом комплексе на ближайшую перспективу определяют необходимость всемерной экономии топливно-энергетических ресурсов, сокращения использования жидкого топлива в энергетике, форсированного развития топливных баз на востоке страны.

УДК 621.311.25

Методика выбора оптимальных расчетных характеристик турбин типа ТК для АТЭЦ. Качан А.Д., Леонков А.М., Сыропушинский В.М., Яковлев Б.В. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 12--16.

Предлагается методика выбора оптимальных расчетных характеристик турбин типа ТК для АТЭЦ, позволяющая комплексно оптимизировать конструктивные характеристики турбин и соотношение электрической и тепловой мощности. --Ил. 1. Библ. 3.

УДК 621.311.22:628.1

Оптимизация режима работы циркуляционной системы ТЭЦ с центральной насосной. Качан А.Д., Леонков А.М., Шишя П.Н. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 16--20.

Рассмотрен метод оптимизации режима работы циркуляционной системы ТЭЦ с центральной насосной и выбора экономического вакуума в конденсаторах турбин на основе использования полученных расчетно-экспериментальным путем приростов мощности турбин и мощности циркуляционных насосов от расхода охлаждающей воды. - Ил. 3. Библ. 3.

УДК 536.71

Относительно уравнения состояния реального газа. Степанчук В.Ф., Романюк В.Н. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 21--24.

На основании общих положений и дифференциальных соотношений термодинамики получен общий вид уравнения состояния реального газа и выражение для относительной упругости в широком диапазоне параметров. -- Библ. 3.

УДК 621.78.013.002.5

Аэродинамический расчет канала рециркуляционной печи. Сбитнева М.М. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 24--30.

Аэродинамический расчет канала рециркуляционной печи состоит в определении потерь напора на диафрагме при различном дросселировании, потерь напора при поворотах канала и на трение. Рассчитана зависимость потерь от скорости течения воздуха в канале, а следовательно, от объемной производительности вентилятора.

Совместное рассмотрение напорных характеристик вентилятора и канала при различном дросселировании даст возможность в дальнейшем определить оптимальный режим работы рециркуляционной печи. -- Ил. 1. Табл. 1. Библ. 4.

УДК 536.244

Экспериментальное моделирование взаимодействия саморегулируемого источника тепла с движущейся тепловой волной. Фатеев Г.А., Тарасевич Л.И. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 30--33.

В работе приведено экспериментальное моделирование источника тепла, представляющего собой цепь последовательно соединенных термистора СТ2-27 и спирали постоянного сопротивления. Показано, что он имеет постоянную времени порядка 200 с и активно взаимодействует с тепловыми волнами толщиной 0,1 м и более, перемещающимися со скоростью примерно $0,3 \cdot 10^{-3}$ м/с, что приемлемо для организации реального процесса. -- Ил. 4. Библ. 1.

УДК 66.071.7.532

Анализ взаимодействия дисперсного адсорбента со стенками канала при пневмотранспорте. Седнин В.А., Романюк В.Н. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 34—37.

На основании модели взаимодействия отдельной частицы адсорбента со стенкой канала рассмотрен вопрос уменьшения истирания сорбента в процессах пневмотранспорта за счет внешнего воздействия на скорость частиц. — Ил. 3. Библ. 3.

УДК 62 - 68:658.26

Использование обратной сетевой воды для сбора избыточного тепла технологических установок. Пинчук Ю.В. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с.37-39.

Рассмотрен вопрос комплексного использования вторичных энергоресурсов (ВЭР) путем теплофикационного преобразования их.

Дан метод сбора вторичных энергоресурсов разного температурного потенциала с помощью обратной сетевой воды.

Показана экономическая целесообразность теплофикационного преобразования ВЭР. — Ил. 1. Библ. 2.

УДК 66.074.8

Экстремумы критериев термодесорбционного процесса в потоке твердого адсорбента. Сомова С.В., Несенчук А. П. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 39—42.

Приводятся математические модели, адекватно описывающие экспериментальные данные по процессу десорбции в потоке твердого адсорбента. Приведены графические зависимости удельных энергозатрат и полноты десорбции от различных факторов. Из анализа приведенных зависимостей ясно, что задача оптимизации термодесорбционного процесса не имеет однозначного решения. — Ил. 1. Библ. 1.

УДК 621.78.001.24

Нагревание цилиндрической садки конечных размеров в печах отделения горизонтально-ковочных машин (ГКМ). Кра -

вещ В.Ф., Несенчук А.П., Малевич Ю.А. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 42—44.

Описывается программа для решения задач, касающихся нагрева тел произвольной формы (граничное условие I рода) на ЭВМ "Минск-32". Приводятся конкретные решения задачи о нагревании цилиндрической заготовки конечных размеров в нагревательной печи участка ГКМ. — Ил. 1, Библ. 1.

УДК 621.311.1 :537.312.62

Критерии подобия для анализа электрических параметров линий электропередачи с коаксиальными фазами. Поспелов Г.Е., Федин В.Т. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 45—50.

На основе анализа размерностей предложены критерии подобия для линий электропередачи с коаксиальными фазами, в которых проводниковыми материалами служат сверхпроводники первого и второго рода. Критерии устанавливают количественную взаимосвязь между различными электрическими параметрами линий. — Библ. 3.

УДК 321.311.1:321.315.05

Необходимые условия стабилизации сверхпроводящих токопроводов из оплеток с технологическим покрытием. Бережной А.В., Корольюк В.Г. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 50—52.

Приводятся необходимые условия, которые должны быть выполнены при стабилизации кабеля с гибкими токопроводами из сверхпроводящих оплеток с технологическим или защитным покрытием. — Ил. 1. Библ. 2.

УДК 621.316

Анализ эффективности функционирования электросетевого предприятия с помощью факторного планирования эксперимента. Короткевич М.А., Травянский М.И. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 52—55.

Показана возможность применения метода факторного планирования эксперимента для анализа эффективности функционирования электросетевого предприятия и нахождения оптимальных значений влияющих факторов. — Библ. 3.

УДК 621.3.016.351

Последовательное планирование некоторых нелинейных обратных регрессионных задач электроэнергетики. Файбисович В.А. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 55--57.

Для решения нелинейных обратных регрессионных задач составлена и отлажена на языке "Алгол-60" программа, реализующая метод последовательного планирования В.В. Федорова. Приводятся результаты ее применения для решения задач электроэнергетики, выполнено сопоставление оптимальных и неоптимальных планов эксперимента. -- Библ. 3.

УДК 621.313.32:538.311

Влияние размеров поперечного сечения проводников на величину электродинамических усилий в лобовой части обмотки статора мощных турбогенераторов. Губанович А.Г. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып.6, с.57--60.

Приведена методика учета влияния размеров поперечного сечения проводников на величину электродинамических усилий в лобовой части обмотки статора мощных турбогенераторов. Приведены результаты расчета на ЭЦВМ "Минск-32" коэффициентов контура электродинамических усилий для лобовой дуги турбогенератора ТВВ-320-2. -- Ил. 1. Библ. 3.

УДК 621.311.1:621.319.4

Инженерный метод нахождения оптимального варианта размещения шунтовых конденсаторных батарей. Пекелис В.Г., Розенберг А.Е. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 61--64.

Предлагается новый метод решения многоэкстремальной задачи рациональной компенсации реактивных нагрузок в электрических сетях на примере размещения шунтовых конденсаторных батарей. -- Библ. 4.

УДК 621.311.017.2/39:681.3

Планирование потерь энергии и мероприятия по их снижению в электрических сетях энергосистем. Шапиро И.З. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып.6, с.64 -- 66.

Приводится экономико-математическая модель совместного планирования потерь энергии и мероприятий по их снижению в электрических сетях энергосистем. Дается понятие оптимального уровня потерь и предлагается способ его определения.

УДК 330.115

Оценка технико-экономической эффективности разгрузочной автоматики энергосистемы. Калентиюк Е.В. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с.66--68

Показано, что при выборе оптимального технико-экономического мероприятия критерий минимума приведенных затрат необходимо дополнять условием, учитывающим риск некупаемости капитальных и эксплуатационных расходов. Приведены аналитические выражения для расчета математического ожидания отдельных составляющих ущерба потребителей при использовании разгрузочной автоматики в энергосистеме. -- Библ. 2.

УДК 621.311.1.017

Факторно-кластерная модель определения потерь энергии в электрических распределительных сетях. Ничипорович Л.В., Филянович Л.П. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 68--70.

Приводится методика расчета потерь в распределительных электрических сетях напряжением 6--10 кВ на основе применения методов факторного и кластерного анализа в сочетании с регрессионной моделью. -- Библ. 3.

УДК 621.315.017

Эквивалентирование режимов сети по потерям электроэнергии. Сыч Н.М., Широчин С.П. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 70--73.

Предложен метод эквивалентирования режимов сети по потерям электроэнергии в сложнзамкнутых сетях с целью его использования при расчетах потерь энергии способом графического интегрирования. -- Библ. 2.

УДК 621.311

Перерасход топлива и снижение мощности в энергосистеме при выводе агрегата в ремонт. Норе́йко М.М. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып.6, с. 73 - 75.

Описана методика определений перерасходов топлива и снижений мощности в гидротепловой энергосистеме при выводе агрегатов в ремонт. Результаты расчетов предназначены для планирования сроков ремонтов, модернизаций и реконструкций основного оборудования энергосистемы. Написана программа на алгоритмическом языке ПЛ-1.

УДК 621.316.37

Аналитическое решение статики гибких шин распределительных устройств с учетом гирлянд изоляторов. Серге́й И.И. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 75—81.

Рассмотрен алгоритм решения уравнений статики гибких шин РУ с гирляндами изоляторов, который позволяет определить не только начальные условия для динамики гибких шин, но и производить механические расчеты гибкой ошиновки РУ при изменении климатических условий. — Ил.1. Библ. 4 .

УДК 621.315.21:537.312.62

Методический подход к оценке показателей надежности криогенных кабельных линий. Ступа́к И.А. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 81—83.

Предлагается методический подход к оценке показателей надежности устройства с высокой электропроводимостью - криогенной кабельной линии. Приводится математическая модель процесса эксплуатации криокабеля, дается понятие о суммарной наработке на отказ, суммарных временных периодах функционирования системы, о времени восстановления работоспособности, а также предполагаются пути определения количественных и эксплуатационных показателей надежности криогенных кабельных линий. — Ил. 2. Библ. 1.

УДК 62 - 83:621.313

Модернизация электропривода периодической подачи. Пете́ренко Ю.Н., Самы́ков Е.П. "Научные и прикладные пробле-

мы энергетики", 1979, вып. 6, с. 84—86.

Для увеличения точности периодической подачи плоскошлифовального станка производится цифровое задание числа оборотов электродвигателя, пропорциональное заданному перемещению. Информация о фактической отработке числа оборотов поступает с датчика обратной связи на блок сравнения, где она сравнивается с заданным числом оборотов. При их равенстве формируется команда на торможение электродвигателя. — Ил. 1. Библ. 2.

УДК 621.313.13

Интегральный показатель влияния упругих связей на переходный процесс в электроприводе. Шафранский В.И., Боровой Б.В. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 87—90.

Для определения степени влияния упругих связей без расчета переходного процесса предложен коэффициент влияния упругих связей, показывающий отношение интегралов квадрата переходного момента при абсолютно жестких и упругих связях. Этот коэффициент выражен через параметры электропривода. Рассматривается также выбор параметров электропривода, при которых коэффициент влияния упругих связей не превосходит наперед заданной величины, — Ил. 1. Библ. 2.

УДК 62-50

Синтез автоматической системы управления с дискретной информацией отклонения. Ползик П.В. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 91—95.

Излагается методика расчета квазиоптимальной системы управления, построенной на основе дискретной информации о состоянии. Рассматривается синтез дискретного анализа линейного непрерывного регулятора для электромеханических установок. — Ил. 2. Библ. 2.

УДК 621.373.213.3

Синтез нестационарных следящих систем с эталонной моделью. Ильин О.П., Примшиц П.П. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 95—98.

Рассматриваются вопросы синтеза следящих систем с пере-

менными параметрами. Изложен метод, позволяющий получить высокое качество течения управляемого процесса при наличии информации только о выходной координате объекта и ее первой производной. — Ил. 2. Библ. 1.

УДК 62 - 83:621.313.3 - 592.3

Тиристорная схема торможения асинхронного двигателя. Лapidус А.И. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 98-101.

Рассматривается тиристорная схема торможения асинхронного двигателя, тормозной эффект в которой достигается действием составляющих момента короткого замыкания и динамического торможения. Схема может быть рекомендована для использования в малоинерционных электроприводах станков и других производственных механизмов. — Ил. 2. Библ. 4.

УДК 681.3.001.2

Функциональный формирователь обратно пропорциональной зависимости. Сидоров В.Г. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 102-105.

Рассматриваются вопросы расчета параметров кусочно-линейной аппроксимации гиперболической функциональной зависимости исходя из условия наилучшего равномерного приближения при заданной относительной погрешности. Предложена практическая схема функционального формирователя гиперболы, даны формулы для расчета основных элементов аппроксиматора, указано, что в предлагаемой схеме может быть достигнута суммарная относительная погрешность 1%. — Ил. 2. Библ. 1.

УДК 62-83:621.313

Анализ электромагнитных процессов преобразователя в инверторном режиме. Михеев Н.Н., Раткевич Е.П. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып.6,с.106-110.

Получены обобщенные уравнения для анализа электромагнитных процессов преобразователя в инверторном режиме, с помощью которых проанализированы электромагнитные процессы преобразователя с нулевыми вентилями. — Ил. 2. Библ.3.

УДК 621.314.26

Высокочастотный стабилизированный тиристорный инвертор. Черномашенцев В.Г., Пацкевич В.А., Зинин Ю.М., Уржумсков А.М. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 110—114.

Исследуется стабилизированный тиристорный инвертор. Наличие неуправляемого диода в нем позволяет эффективно стабилизировать напряжения на элементах схемы. Установлено, что по коэффициенту использования тиристоров по мощности данный инвертор не уступает схеме со встречно-параллельными диодами. Рассматриваемый инвертор может использоваться в преобразователях частоты для индукционного нагрева и плавки металлов. — Ил. 3. Библ. 6.

УДК 621.3.052.33

Исследование несимметричных режимов трехфазной цепи с изолированной нейтралью. Купчинова Э.В., Розум Т.Т. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып.6, с.114—119.

Рассмотрен метод построения круговой диаграммы несимметричной трехфазной цепи с изолированной нейтралью для случая, когда нагрузка двух фаз неизменна, а сопротивление третьей фазы изменяется по величине и характеру. Разность аргументов и отношение модулей сопротивлений этих фаз позволяет определить на диаграмме положение нейтральной точки приемника, фазные напряжения и напряжение смещения нейтрали. — Ил. 2. Библ. 1.

УДК 621.314.26

Определение коэффициентов аппроксимации кривой намагничивания трансформатора-преобразователя частоты. Бладыко В.М., Сончик Л.И. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 120—122.

Предложен метод определения коэффициентов аппроксимации кривой намагничивания трансформатора-преобразователя частоты по опытам холостого хода и короткого замыкания при работе его в режиме утроителя частоты — Ил. 2. Библ. 6.

УДК 621.311.4

Парциальный принцип в промышленных электрических нагрузках. Лившиц В.С. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 122—125.

Парциальный принцип для определения расчетного максимума нагрузки группы разнородных электроприемников рассматривается на основе общей теории суммирования разнородных электрических нагрузок.

Проводится аналогия между парциальными принципами в теории электрических нагрузок и физической теории смеси идеальных газов. — Библ. 4.

УДК 621.3.013.62.001.24

Расчет оптимальной емкости фильтров феррорезонансного стабилизатора напряжения. Бладыко В.М., Можар В.И. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 125—128.

Предложен инженерный способ расчета оптимальной емкости фильтров феррорезонансного стабилизатора напряжения.— Ил.1. Библ. 1.

УДК 621.3.054; 621.316.13

Об эффективности повышения напряжения устройства с управляемым реактором. Демиденко Л.И., Яцкевич В.В. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 128—130.

Теоретически анализируется эффект повышения напряжения в распределительных сетях 10 кВ, достигаемый устройством, состоящим из батареи продольной компенсации и управляемого реактора. — Ил. 1. Библ. 2.

УДК 621.313.333

Динамические свойства тиристорного электропривода постоянного тока при набросе нагрузки. Михеев Н.Н., Раткевич Е.П., Сацукевич В.Н. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 130—133.

Анализируются динамические свойства тиристорного электропривода при набросе нагрузки в интервалы времени между

моментом открывания очередного вентиля и моментом, соответствующим углу естественного открывания последующего вентиля. Приводятся математические выражения и графические зависимости при различных значениях коэффициента демпфирования для определения возможного отклонения скорости двигателя при набросе нагрузки в интервале неуправляемости выпрямителя для непрерывного и прерывистого режимов. — Ил. 1. Библ. 1.

УДК 621.31.003.1

Оптимальное распределение производства энергии между электростанциями при текущем планировании основного производства энергосистемы. Падалко Л.П., Баранников А.И., Никольская Н.Н. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 134–138.

Предлагается математическая модель оптимального распределения производства энергии между электростанциями энергосистемы при месячном, квартальном и годовом планировании основного производства. Схема решения задачи включает два этапа: на первом осуществляется распределение тепловой энергии между агрегатами ТЭЦ, на втором этапе – распределение производства электроэнергии между КЭС и конденсационными хвостами ТЭЦ.

УДК 621.175.81:65.012.122

Уравнения для анализа в АСУ ТП влияния режима главных эжекторов на экономичность турбоустановки Т-250-240. Бабель Л.А., Щербич В.И. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 139–143.

Предложены выражения для определения перерасходов тепла на турбоагрегат при отклонении фактического режима работы главных эжекторов от нормативного.

Использование полученных выражений в АСУ ТП позволит определять оптимальные режимы эжекторов и производить оперативный контроль их работы.

Как показывают расчеты, в ряде случаев из-за отклонения от оптимального режима эжекторов увеличение удельного расхода тепла на турбоустановку значительно и достигает 1,5%. — Табл. 1. Библ. 3.

УДК 518.512.3:621.311

Алгоритм программы вывода рисунка силового поля на АЦПУ. Павловец В.В. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 144—145.

Приведен алгоритм и блок – схема программы вывода рисунка силового поля на широкую печать ЭВМ.

Программа вывода рисунка силового поля на АЦПУ позволяет получить наглядную картину о характере и распределении силового поля в пространстве. -- Ил. 1. Библ. 1.

УДК 621.316:681.142

К вопросу построения автоматизированной системы энергоиспользования промышленного предприятия. Ничипорович Л.В., Ус А.Г. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 145—147.

Одним из основных вопросов промышленной энергетики является разработка автоматизированных систем управления энергохозяйством (АСУЭ).

Проводятся исследования по вопросам построения АСУЭ. Определены функции, выявлены задачи АСУЭ.

В развитие разработки математического обеспечения АСУЭ составлена программа комплексного расчета распределительной сети 6–10–20 кВ.

УДК 62-83:621.9

Анализ режимов работы и требования к электроприводу главного движения продольно-шлифовальных станков. Петренко Ю.Н., Гульков Г.И. "Научные и прикладные проблемы энергетики", 1979, вып. 6, с. 147—150.

Проведен анализ режимов работы продольно-шлифовального станка. Сформулированы требования к электроприводу главного движения продольно-шлифовальных станков. –Библ. 1.