

СЕКЦИЯ 1. Электрические станции

УДК 621.3-057.875

Подготовка специалистов по заочной форме обучения специальности «Электрические станции»

БУЛАТ В.А.

Белорусский национальный технический университет

Современные электрические станции являются фундаментом энергетики и в полной мере обеспечивают электроснабжение промышленных и сельскохозяйственных предприятий и комплексов Республики Беларусь.

Начиная с 2010 года подготовка специалистов по специальности 1-43 01 01 «Электрические станции» (специализация 1-43 01 01 02 «Электрооборудование электростанций и подстанций») на кафедре «Электрические станции» энергетического факультета БНТУ будет осуществляться не только по дневной форме обучения, но и по заочной.

В соответствии с контрольными цифрами приема 2010 году на бюджетную форму обучения планируется принять 10 человек и на условиях оплаты – 42 человека. Таким образом, будут сформированы 2 группы заочного обучения.

На обучение за счет средств республиканского бюджета могут претендовать выпускники общеобразовательных учреждений, учреждений образования, обеспечивающих получения профессионально-технического образования с общим средним образованием, среднего специального образования по профилю вышеназванной специальности. На места сверх конкретных цифр приема установленные планом приема на обучение на условиях оплаты, зачисление абитуриентов будет проводиться по общему конкурсу. Размер платы за обучение будет определен БНТУ в соответствии с законодательством.

Для обучения студентов-заочников кафедрой «Электрические станции» БНТУ разработан учебный план на срок обучения 6 лет. Планом предусматривается изучение всех тех дисциплин, которые изучаются студентами дневной формы обучения. Формы отчетности по каждой дисциплине такие же, как и формы отчетности предусмотренные учебным планом для студентов дневного отделения.

Инженер-энергетик данной специализации готовится для производственно-технологической, организационно-управленческой, проектно-исследовательской и научной деятельности в области проектирования, монтажа, эксплуатации, ремонта и наладки электрической части действующих, вновь сооружаемых и реконструируемых тепловых и атомных электростанций и подстанций.

Цеплавая засцярога электрухавіка

Бобка М.М.

Беларускі нацыянальны тэхнічны ўніверсітэт

Мікрапрацэсарная элементная база дазваляе рэалізацыю рэлейных засцярог, якія патрабуюць значных разліковых работ. Адной з такіх засцярог з'яўляецца цеплавая засцярога электрычнага рухавіка. Мікрапрацэсарная цеплавая засцярога рухавіка ад сіметрычнай перагрузкі рэалізуецца шляхам мадэлявання цеплавога стану рухавіка. Рашэнне дыферэнцыяльнага раўнання, якое апісвае цеплавы стан рухавіка як суцэльнага цела, мае выгляд:

$$\Theta = \Theta_{\infty} \left(1 - \varepsilon \frac{\tau}{T_n} \right) + \Theta_0 \varepsilon \frac{\tau}{T_n}.$$

дзе Θ – тэмпература перагрэву; Θ_0 – тэмпература ў пачатку пераходнага цеплавога рэжыму; Θ_{∞} – чаканая ўсталяваная тэмпература рухавіка, якая адпавядае нязменнаму чаканаму ўсталяванаму значэнню тока нарузкі і да якой імкнецца бягучая тэмпература Θ рухавіка; T_n – цеплавая пастаянная часу нагрэву, с.

Першы складнік правай часткі формулы апісвае працэс нагрэву ад нулявой пачатковай тэмпературы да ўсталяванай тэмпературы Θ_{∞} , а другі складнік формулы – працэс ахалоджвання ад пачатковай тэмпературы Θ_0 да нулявой тэмпературы. Сума двух складнікаў у формуле адначасова апісвае працэс нагрэву або ахалоджвання ў залежнасці ад стасунку лікавых велічынь пачатковай Θ_0 і канчатковай Θ_{∞} тэмператур пераходнага рэжыму. Пасля адключэння рухавіка яго сістэма ахалоджвання перастае дзейнічаць, таму пастаянная ахалоджвання павялічваецца і можа складаць 1,5–4 пастаяннай нагрэву, што неабходна ўлічваць пры бесперапынным разліку тэмпературы.

Цяпло, якое выдзяляецца ў рухавіку, прапарцыяна магутнасці электрычных страт і, адпаведна, квадрату тока статора:

$$\Theta_{\infty} = \Theta_n \left(\frac{I_{\infty}}{I_n} \right)^2,$$

дзе Θ_n і I_n – адпаведна намінальныя велічыні тэмпературы і тока, на якія спраектаваны рухавік. Апошняя формула дазваляе па бягучаму значэнню тока разлічыць адпаведнае яму чаканае ўсталяванае значэнне тэмпературы.

Прыведзены алгарытм можа быць выкарыстаны для рэалізацыі цеплавой мікрапрацэсарнай засцярогі электрычнага рухавіка.

Теоретические положения и методы реализации адаптивной микропроцессорной защиты линий

Тишечкин А.А.

Белорусский национальный технический университет

По принципу действия токовая защита реагирует на увеличение тока сверх ее тока срабатывания, которое может произойти не только при коротких замыканиях (КЗ), но и при подключении дополнительной нагрузки, а также при самозапуске электродвигателей. Ток срабатывания токовых защит рассчитывается заранее, исходя из наиболее тяжелых режимов работы оборудования, и остается неизменным при изменении режимов работы распределительной сети. Такое исполнение приводит к снижению основных показателей их технического совершенства: зависимости длин защищаемых зон от режимов работы питающих систем и вида КЗ, недостаточной чувствительности и защитоспособности отдельных ступеней токовых защит.

Улучшить основные показатели технического совершенства токовых защит, расширить область их использования можно путем разработки и исследования адаптивной токовой защиты, автоматически изменяющей свой ток срабатывания в зависимости от вида КЗ.

В основу принципа выполнения адаптивной микропроцессорной токовой защиты линий с односторонним питанием положено выделение максимального I_{\max} и минимального I_{\min} значений из токов фаз защищаемого объекта и определение текущего значения показателя несимметрии ΔI токов фаз $\Delta I = (I_{\max} - I_{\min})/I_{\max}$, которое затем сравнивается с уставкой ΔI_3 .

В нормальном режиме, при симметричной перегрузке, самозапуске электродвигателей и при трехфазном КЗ $\Delta I < \Delta I_3$, и измерительные органы работают с изначально заданными уставками. При несимметричных междофазных КЗ, к которым ступенчатые токовые защиты имеют пониженную чувствительность, $\Delta I > \Delta I_3$, и токи срабатывания ступеней защиты автоматически изменяются, за счет чего повышается чувствительность защиты. Для определения величины ΔI_3 , обеспечивающей надежность определения основных показателей технического совершенства защиты, были разработаны математические модели распределительной сети с одним источником питания и самой защиты и соответствующие компьютерные программы.

Измерительные органы основаны на контроле действующих значений гармоник основной частоты, которые выделяются из сложных входных сигналов, с помощью частотных фильтров. В качестве частотных фильтров использовались цифровые нерекурсивные частотные фильтры.

Теории оценки уровней перенапряжений при дуговых замыканиях

ЕРОФЕЕНКО Т.С.

Белорусский национальный технический университет

Основоположником теории перенапряжений является Петерсен, который в 1916 г. объяснил физическую сущность процесса, состоящую в следующем: горение дуги продолжается полпериода свободных колебаний; значения угловой частоты свободных колебаний при горении дуги $\omega_{\kappa} = 1/\sqrt{3LC}$; при первом прохождении тока колебаний через нуль дуга погасает; значение частоты при восстановлении $\omega_{\text{в}} = 1/\sqrt{LC}$; повторное зажигание дуги наступает через полпериода промышленной частоты при максимальном напряжении на поврежденной фазе; время горения дуги при каждом повторном зажигании равно полупериоду свободных колебаний; после каждого гашения дуги возрастает напряжение смещения нейтрали; восстановление напряжения на поврежденной фазе имеет колебательный характер с пиком, превышающим величину $U_{\text{ф}}$; диэлектрическая прочность места повреждения нарастает быстрее, чем величина восстанавливающегося напряжения; с учетом ограничивающего влияния междуфазных емкостей и затухания колебаний уровни перенапряжения достигают $3,6U_{\text{ф}}$.

В 1923 г. Петерс и Слепян предложили теорию перенапряжений, отличную от теории Петерсена: горение дуги продолжается до перехода через нуль тока промышленной частоты; гашение дуги происходит без переходного процесса; после каждого гашения дуги напряжение смещения нейтрали остается постоянным и равным $U_{\text{ф}}$; повторные зажигания дуги происходят регулярно через каждый период при максимальном напряжении на поврежденной фазе; длительность горения дуги при каждом повторном зажигании равна полупериоду; восстановление напряжения на поврежденной фазе после гашения дуги происходит плавно с частотой; перенапряжения на здоровых фазах не превышают значений $(3,0-3,1)U_{\text{ф}}$.

В 1957 г. Беляков Н.Н. предложил теорию возникновения перенапряжений, занимающую промежуточное положение между теориями Петерсена и Петерса и Слепяна: гашение дуги происходит при каждом прохождении тока через нуль; повторное зажигание дуги происходит через малую долю периода собственных колебаний при малых напряжениях восстановления; гашение дуги на длительное время имеет место в тех случаях, когда высокочастотный максимум восстанавливающегося напряжения достаточно мал и становится меньше величины диэлектрической прочности изоляции; максимально возможные перенапряжения с учетом затухания и междуфазных емкостей равны $3,2U_{\text{ф}}$.

Компьютерная программа расчета электродинамических усилий в жесткой ошиновке распределительных устройств 10 кВ

Климкович П.И., Шпаковский А.А.

Белорусский национальный технический университет

Разработана компьютерная программа (КП), в которой реализован явный метод расчета электродинамических усилий в жесткой ошиновке распределительных устройств при произвольной ориентации шин и изоляторов. Рассматривается случай металлического трехфазного короткого замыкания. Учет ферромагнитных масс не производится. В программе учитываются параметры основных конструктивных элементов пролета распределительного устройства и короткого замыкания.

КП составлена на языке C++ в системе визуального объектно-ориентированного программирования C++ Builder 6. При разработке графического интерфейса программы основной задачей было создание эргономичного и понятного интерфейса. Ввод координат фаз для простоты и наглядности их расположение организован вручную и графически. При графическом вводе при перемещении курсора мышью координаты изменяются в режиме реального времени. При необходимости можно скорректировать значения вручную или же построение начать заново. При переходе с вкладки «Расчетные данные» на любую другую программа производит расчет и выводит на экран полученные значения. Вкладка «Общая информация по фазам» содержит в себе информацию по шинам, представленную в текстовом виде. В правой части вкладки расположен огибающий годограф векторов электродинамических усилий. На

вкладках «Фаза А», «Фаза В», «Фаза С» в графическом виде предоставлены результаты расчетов по соответствующим фазам. При необходимости повторного расчета достаточно перейти на главную страницу и внести нужные изменения – перерасчет программа выполнит самостоятельно. После завершения расчетов имеется возможность сохранения исходных данных и результатов расчета, а так же печати отчета.

Разработанная КП расчета электродинамических усилий может быть использована в практике конструкторских работ по разработке шинных конструкций с произвольной ориентацией шин и изоляторов.

Итерационный синтез следящих систем с разрывными законами управления

МАРКИНА Л.И., МИХАЛЕВ А.С.

Республиканский институт высшей школы БГУ

Сложные иерархические и тем более нелинейные системы автоматического управления (САУ) создаются, как правило, эволюционно в результате многократных и целенаправленных процедур синтеза [1, 2].

В докладе изложена разработанная авторами концепция итерационного синтеза следящих систем с разрывными законами управления, хорошо зарекомендовавшая себя в ходе проектирования десятков конкретных систем, созданных для исследования околоземного космического пространства, изучения и освоения Мирового океана, развития оборонной техники, атомной энергетики и промышленной робототехники.

Сущность подхода состоит в поэтапном, эволюционном структурно-параметрическом синтезе следящих систем, когда на первой итерации синтеза обеспечивается устойчивость свободных движений систем, а также устанавливаются целесообразные разрывные способы управления и их структурные реализации, на второй итерации – выполняется параметрический синтез нелинейных регуляторов, исходя из требований к качеству переходных процессов при скачкообразных входных воздействиях, на третьей – обеспечивается заданная точность вынужденных движений систем в типовых режимах, для чего совершенствуется структура регулятора, которая снабжается дополнительными нелинейными связями и блоками и, наконец, на четвертой итерации – структура нелинейных регуляторов и их параметры окончательно определяются при учете возможных сопутствующих нелинейностей в конкретных ситуациях проектирования систем.

Доклад проиллюстрирован перечисленными процедурами синтеза на основе метода гармонической линеаризации нелинейностей, а также с использованием показателя колебательности систем и нормированных коэффициентов гармонической линеаризации основных законов нелинейного управления на примере комбинированной следящей системы с параметрическим асимметрированием псевдолинейного регулятора.

Литература

1. Маркина, Л.И. Итерационный синтез автоматических систем с разрывными законами управления / Л.И. Маркина, А.С. Михалев // Выбранные научные работы Белорусского государственного университета. Т. 4: Фізика. – Минск: БДУ, 2001. – С. 586–605.
2. Васильев, А.И. Структурно-параметрическое асимметрирование регуляторов в системах с разрывными законами управления / А.И. Васильев, Л.И. Маркина, А.С. Михалев // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 1. – С. 31–43.

Влияние крутильных колебаний одиночных проводов и гасителей-маятников на параметры пляски

СЕРГЕЙ И.И., КЛИМКОВИЧ П.И.

Белорусский национальный технический университет

Представлены два способа ограничения пляски проводов: расстройка крутильных колебаний и их демпфирование. Их анализ выполнен с помощью разработанных математической модели и численного метода расчета. Формулировка краевой задачи включает в себя нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных изгибных и крутильных колебаний проводов, уравнения динамики маятников и начальные условия до пляски. Аэродинамические силы и моменты определяются с учетом опытных характеристик проводов. При формулировке краевой стационарной задачи положения проводов до пляски учитывается расположение маятников на проводе и влияние защитных протекторов.

Численный эксперимент выполнен для одиночных проводов ЛЭП с пролетами 100–240 м и проводами сечением 95–150 мм². Расчетная схема включала в себя один вертикальный и четыре горизонтальных маятника, первоначальный угол расположения, которых являлся исходной величиной. Исследования выполнялись для горизонтальных маятников, расположенных в одну и разные стороны относительно оси провода. Оценивалось влияние веса, длины рычага и крутильной вязкостной жесткости крутильных демпферов и маятников на параметры пляски проводов.

Численные расчеты показали, что комбинированная схема установки вертикальных и горизонтальных маятников успешно справляется с гашением пляски проводов с числом полувольт от 1 до 4. Наибольшим эффектом обладает схема с односторонними маятниками, обеспечивающая гашение, начиная с первоначальных углов в 30°. С помощью разработанной компьютерной программы определены углы маятников после их монтажа на проводах для различных схем расстановки маятников. Основное влияние на пляску проводов оказывает не вес, а длина рычага маятника (l_p), которая определяет частоту его собственных колебаний (f_m). При $l_p = 0,65–0,75$ м f_m приближается к частоте пляски провода, которая для провода АС-120/19 в пролете 160 м в зависимости от параметров маятников находится в диапазоне 0,54–0,63 Гц. Установлено, что величина крутильной вязкостной жесткости демпферов маятников не оказывает существенного влияния на размах вертикальных колебаний проводов при пляске.

Разработанный численный метод расчета пляски проводов воздушных ЛЭП пригоден для постановки вычислительного эксперимента по оценке эффективности различных схем расстановки маятниковых гасителей колебаний и выбору их параметров.

**Методы повышения электродинамической стойкости
и аэродинамической стабильности токоведущих конструкций
с гибкими проводами электроустановок энергосистем**

СЕРГЕЙ И.И., Пономаренко Е.Г., Климкович П.И.
Белорусский национальный технический университет

В процессе эксплуатации электроустановок энергосистем с гибкими проводниками возникают аварийные режимы, обусловленные электродинамическим действием токов короткого замыкания и колебаниями обледенелых проводов в потоке ветра (пляской проводов). В связи с этим нормативными документами предусматривается проверка элементов электроустановок на стойкость к указанным воздействиям.

На кафедре «Электрические станции» БНТУ разработаны методы расчета электродинамической стойкости и пляски проводов с учетом конструктивных элементов электроустановок. Сформулированы краевые задачи динамики проводов под действием электродинамических и аэродинамических усилий. Разработаны алгоритмы расчета начального положения гибких проводников в нормированных Правилами устройства электроустановок режимах климатических нагрузок при КЗ до аварийного режима. Разработаны математические модели динамики специальных устройств для ограничения размаха колебаний проводов и их гашения. Они позволяют оценить эффективность гасителей маятников типа для одиночных и комбинированного типа для расщепленных проводов воздушных ЛЭП. Разработанный метод позволяет определить первоначальные углы установки горизонтальных маятников, при которых после монтажа они занимают положение, близкое к горизонтальному, наиболее эффективному для расстройки крутильных колебаний проводов. Он приспособлен для оценки предельных углов откручивания горизонтальных маятников после монтажа, при которых они обеспечивают гашение пляски проводов, и обоснования схемы их совместной установки с вертикальными маятниками.

При расчете электродинамической стойкости гибкой ошиновки распределительных устройств высокого напряжения крупных электростанций метод учитывает влияние междуфазных изолирующих распорок и дополнительных опорных изоляторов на размах колебаний гибких шин при коротких замыканиях. Разработан пакет компьютерных программ расчета электродинамической стойкости FLEBUS, пляски PLIAS и начальных условий MR1, достоверность расчетов по которым неоднократно проверялась сопоставлением расчетных и опытных данных. Они использовались при конструировании и проектировании токоведущих конструкций с гибкими проводниками электроустановок энергосистемы Беларуси.

Расчет геометрических характеристик плоского сечения в математической системе MathCAD

КОВАЛЬ А.А., ЕРОФЕЕНКО Т.С.

Белорусский национальный технический университет

В инженерной практике часто требуется рассчитать геометрические параметры того или иного сечения, влияющие на его прочностные или жесткостные характеристики. В задаче требуется найти положение главных центральных осей и главные моменты инерции для произвольного сечения, ограниченного двумя кривыми и вертикальной прямой, расположенной на известном расстоянии от оси z (рис. 1). Для этих целей бы использован программный пакет MathCAD.

Вычисление геометрических характеристик сечения производится с помощью прямого использования формул, определяющих статические моменты, осевые и центробежные моменты инерции и др. Для этого сводятся интегралы к повторным, рассчитав пределы интегрирования.

Программный модуль позволяет в интерактивном режиме изображать сечение и систему главных центральных осей при произвольных значениях исходных данных (рис. 2).

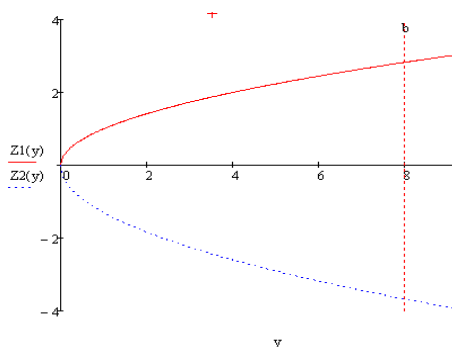


Рис. 1

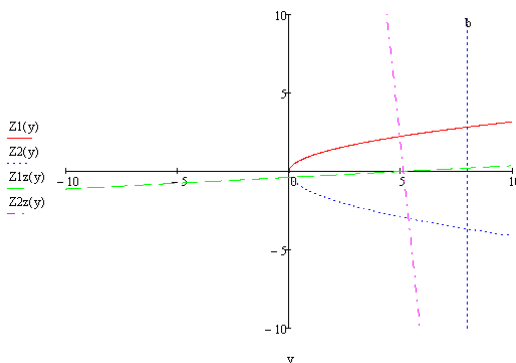


Рис. 2

Литература

1. Макаров, Е.Г. Сопротивление материалов на базе MathCAD / Е.Г. Макаров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 512 с.

Расчет электрического поля системы цилиндрических электродов в математической системе MathCAD

КОВАЛЬ А.А.

Белорусский национальный технический университет

В ходе исследования было рассмотрено электромагнитное поле протяженного цилиндрического заземлителя, проложенного параллельно границе раздела воздух-грунт.

Целью работы явилось нахождение волновых параметров заземлителя. Основное допущение, использованное в расчетах, предполагает независимость векторов поля на поверхности заземлителя от угла θ . Для достижения данной цели была поставлена задача определения электрического поля, распределения тока, стекающего с трубопровода в грунт, шагового напряжения и напряжения прикосновения, а также характеристик электрического взаимодействия трубопроводов с протяженными заземлителями и друг с другом. Поперечное электрическое поле заземлителя допустимо определять через стационарное поле тока проводимости стекающего с заземлителя. Аналогичным образом допустимо использовать этот метод и при оценке величин токов, перетекающих с заземлителей на трубопроводы, оболочки кабелей и другие протяженные объекты.

Решение представленной задачи было реализовано в пакете MathCAD. Получены зависимости распределения тока на поверхности трубопровода при различных геометрических характеристиках трубопровода и заземлителя. Один из вариантов проведенных расчетов представлен на рис. 1.

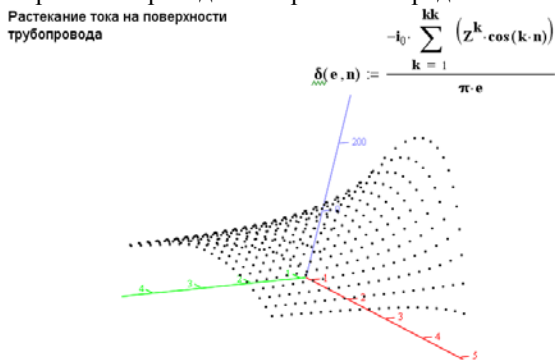


Рис. 1

Литература

1. Слышалов, В.К. Расчет электрического поля и параметров системы цилиндрических электродов / В.К. Слышалов, А.В. Слышалов, Ю.В. Кандалов, Д.А. Полкошников // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 2. – С. 84–87.

Принцип выполнения цифровой части адаптивной микропроцессорной токовой защиты

РОМАНЮК Ф.А., РУМЯНЦЕВ В.Ю., ТИШЕЧКИН А.А., НОВАШ И.В.,
БОБКО Н.Н., ГЛИНСКИЙ Е.В.

Белорусский национальный технический университет

На рис. 1 представлена функциональная схема цифровой части (ЦЧ) микропроцессорной токовой защиты. На входе в цифровую часть сигналы проходят обработку цифровым фильтром (ЦФ), затем определяются их действующие значения на основе обработки ортогональных составляющих, после чего они поступают на входы макси (MAX) и миниселектора (MIN).

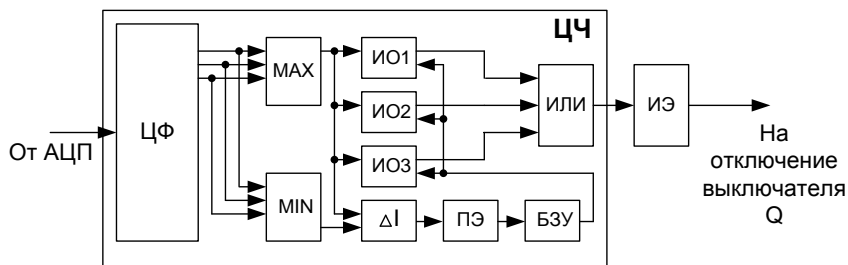


Рис. 1

Сигналы с выхода MAX поступают на измерительные органы ИО1, ИО2, ИО3, в которых заданы уставки соответственно токовой отсечки (ТО), ТО с выдержкой времени и максимальной токовой защиты (МТЗ). Оба сигнала с выхода MAX и MIN поступают на вход элемента « ΔI », в котором определяется текущее значение несимметрии ΔI токов фаз, которое затем в пороговом элементе (ПЭ) сравнивается с уставкой ΔI_3 . В нормальном режиме, при симметричной перегрузке, самозапуске электродвигательной нагрузки, а также при трехфазных КЗ $\Delta I < \Delta I_3$, и сигнал на выходе ПЭ отсутствует, следовательно, ИО защиты работают с изначально заданными уставками. Если $\Delta I > \Delta I_3$, то КЗ считается несимметричным, и производится коррекция уставок ступеней защиты в БЗУ. После этого осуществляется сравнение текущего значения тока с заданным и принимается решение о выдаче команды на отключение соответствующей ступенью защиты. Таким образом, цифровая часть выполняет функции основной обработки информационных параметров входных сигналов и включает в себя логико-математические операции для определения контролируемых величин и распознавания на их основе состояния защищаемой линии.

**Компьютерная программа
расчета электродинамических усилий
в системе жестких проводников**

ПОНОМАРЕНКО Е.Г., СПАСКОВ А.А.

Белорусский национальный технический университет

На кафедре «Электрические станции» БНТУ разработана компьютерная программа (КП) NUMEF, которая позволяет рассчитать электродинамические усилия (ЭДУ) в системе в системе жестких проводников, произвольно расположенных в пространстве с учетом наличия отпаяк к электрическим аппаратам. КП была создана для решения прикладной задачи в связи с тем, что ГОСТ по расчету электродинамического действия токов короткого замыкания предлагает расчетные выражения для определения ЭДУ в системе жестких шин, расположенных в ряд или по вершинам равностороннего или прямоугольного треугольника. Математическая модель программы основана на векторно-параметрическом методе определения ЭДУ, который ранее применялся в системе гибких проводников.

Для проверки компьютерной программы был проведен расчет для шин, расположенных в ряд в горизонтальной плоскости (рис. 1). Результаты компьютерного расчета сопоставлены с результатами ручного расчета по аналитическим формулам, приведенным в вышеуказанном ГОСТ (табл. 1).

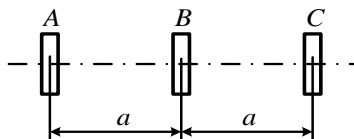


Рис. 1. Пролет с жесткими
шинами: $a = 250$ мм, $l = 10$ м,
 $I_n = 25$ кА, $T_a = 0,048$ с

Таблица 1. Сопоставление результатов ручного и компьютерного расчета

Фаза	Ручной расчет	Компьютерный расчет			Δ , %
	f_{max} , Н/м	t , с	ψ , град	f_{max} , Н/м	
A	2644	0,01	345	2643	<1
B	2833	0,01	75	2836	<1
C	2644	0,01	75	2644	0

Результаты расчета ЭДУ для проектируемой ячейки КРУ К-БЭМН, ошиновка которой расположена в вершинах произвольного треугольника, при величине ударного тока КЗ 64 кА показали, что возникающие изгибающие нагрузки на изоляторы велики и могут их разрушить. Была рекомендована замена изоляторов на более прочные.

Основы построения упрощенной модели векторного гистерезиса

Толмачёв С.Т., Ильченко А.В., Батраков Д.В.
Криворожский технический университет

Рассмотрим физическую трактовку процесса, который вписывается в рамки формально введённого ранее гистерезиса [1, 2]. Пусть задана одноосная частица с однородной намагничённостью J_s и константой анизотропии. Определим полную свободную энергию частицы как сумму её энергии относительно внешнего поля, и энергии магнитной анизотропии. Положение оси лёгкого намагничивания зададим углом φ , направление внешнего поля углом Ψ , внешнее поле H , а равновесное состояние вектора намагничённости – углом θ между векторами напряжённости H и намагничённости J . Гистерезис каждой частицы происходит за счёт процесса вращения её вектора намагничённости. Тогда множество равновесных значений $\theta(H, \Psi)$, соответствующих минимуму Φ , является областью значений определяющего функционала гистерезиса (ОФГ)

$$\begin{cases} H \sin \theta - \sin 2(\psi - \theta) = 0, \\ H \cos \theta + \cos 2(\psi - \theta) > 0 \end{cases} \quad (1)$$

откуда легко определить θ для произвольных значений h и Ψ .

Множество критических состояний определяется из системы

$$\begin{cases} 2h \sin \theta - \sin 2(\psi - \theta) = 0, \\ h \cos \theta + \cos 2(\psi - \theta) = 0. \end{cases}$$

Гистерезис каждой микрочастицы описывается трансцендентным тригонометрическим уравнением (1), поэтому основное время при расчёте вектора намагничённости макрообъёма вещества затрачивается на решение этого уравнения.

По аппроксимированной линии критических состояний можно определить устойчивые состояния угла $\varphi(h, \Psi)$ – область обратимых состояний. «Скачек» угла φ возможен только по достижению линии критических состояний. «Переброс» никогда невозможен если $|\psi| \leq \pi/2$ или $h \leq 0,5$. Это условие надо ставить первым при определении состояния ОЛН частицы. Знак угла φ всегда совпадает со знаком угла Ψ .

Литература

1. Толмачов, С.Т. Специальные методы решения задач магнитостатики / С.Т. Толмачов. – Киев: Высшая школа, 1983. – 166 с.
2. Толмачев, С.Т. Математическая модель гистерезиса ферромагнетиков / С.Т. Толмачов // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1983. – № 5. – С. 43–53.

Структурная схема адаптивной микропроцессорной токовой защиты

РОМАНЮК Ф.А., РУМЯНЦЕВ В.Ю., ТИШЕЧКИН А.А., НОВАШ И.В.,
БОБКО Н.Н., ГЛИНСКИЙ Е.В.

Белорусский национальный технический университет

Адаптивная микропроцессорная токовая защита линии может быть реализована с помощью структурной схемы, представленной на рис. 1. В указанной структуре осуществляется переработка информации, поступающей от защищаемой линии в виде токов, распознается ее состояние и формируются соответствующие воздействия на коммутационный аппарат.

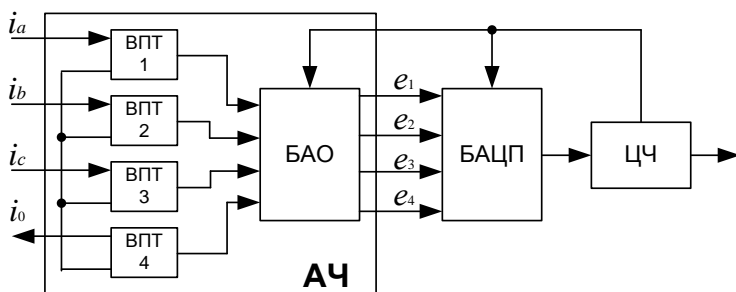


Рис. 1

Весь процесс переработки информации в защите можно разделить на два этапа: предварительная обработка входных токов и основная обработка их информационных параметров с целью получения контролируемых величин.

На этапе предварительной обработки осуществляется передача, преобразование, измерение и обработка входных токов i_a , i_b , i_c , i_o , а также определение их информационных параметров, по которым рассчитываются контролируемые величины.

В состав аналоговой части (АЧ) входят входные преобразователи тока (ВПТ) и блок аналоговой обработки сигналов (БАО).

Этап основной обработки включает логико-математические операции с указанными параметрами и осуществляется в цифровой части (ЦЧ). Согласование сигналов АЧ и ЦЧ выполняется в блоке аналого-цифрового преобразования (БАЦП).

Данный принцип построения является наиболее универсальным, позволяющим выполнить токовые защиты с различными алгоритмами функционирования на основе одних и тех же блоков АЧ и цифровых программируемых средств без изменения структурной организации.

Реализации задачи обеспечения цифровыми устройствами защиты и автоматики отечественного производства подстанций 110/35/10 кВ

СТРЕЛЮК И. Ч., ЛОМАН М. С., КОРОЛЕВ С. П.

Белорусский национальный технический университет

Более 40 лет РУП «Белэлектромонтажналадка» выполняет комплекс работ по проектированию, поставке, монтажу и наладке электротехнического оборудования, КИПиА и систем управления. Организация обладает необходимыми для осуществления данных видов деятельности лицензиями Республики Беларусь, Российской Федерации, Республики Литва.

Помимо выполнения вышеуказанного комплекса работ предприятие является ведущим разработчиком цифровых защит в Республике Беларусь, широко внедряемых на объектах Белорусской энергосистемы и промышленных предприятиях, а также в ряде энергосистем РАО «ЕЭС России».

По заказу концерна «Белэнерго» в 1997 г. началась разработка цифровых защит. К 1999 г. выпущена опытная партия защит МТЗ-610 ЛВ. На основании опыта эксплуатации устройство было дополнено защитой от замыканий на землю по высшей гармонике, увеличено число дискретных входов. Устройство получило название МТЗ-610Л.3 (МР300). В дальнейшем была разработана защита двигателя МТЗ-610Д.3М (МР330). В 2002 г. защиты МР300 и МР330 прошли сертификационные испытания в испытательном центре «Фирма ОРГРЭС». Устройства 3-й серии нашли свою нишу в виде защит отходящих линий.

Для реализации защит ввода и секционного выключателя в 2003 г. было разработано устройство МР500. В том же году было разработано устройство МР600, защита по частоте и напряжению. В 2005 г. устройства МР500 и МР600 прошли сертификационные испытания в ОАО «ВНИИЭ».

В 2006 г. проведены испытания и начато серийное производство направленной токовой защиты МР700. Устройство имеет аналоговые входы по току и напряжению и сочетает функции МР500 и МР600.

В рамках Государственной научно-технической программы «Разработка и освоение методов, технологий, оборудования и систем, обеспечивающих эффективное и устойчивое функционирование топливно-энергетического комплекса Республики Беларусь» («Энергетика-2010») сотрудниками РУП «Белэлектромонтажналадка» разработано и организовано производство универсального терминала защиты (ТЗЛ) для распределительных сетей 6–35 кВ.

Разработка терминала ТЗЛ (МР741) и терминала дифференциальной защиты трансформатора УДЗТ (МР801) явилось завершающим этапом в реализации задачи обеспечения устройствами релейной защиты и автоматики отечественного производства подстанций 110/35/10 кВ.

Выбор методов расчета электродинамической стойкости различных участков гибкой ошиновки

СЕРГЕЙ И.И., ПОНОМАРЕНКО Е.Г.

Белорусский национальный технический университет

В типовых конструкциях распределительных устройств напряжением 110–330 кВ гибкая ошиновка располагается в трех ярусах. Нижний ярус образуют гибкие проводники, соединяющие электрические аппараты между собой. Выше располагаются провода шинных пролетов. Верхний ярус образуют провода ячеек. Наиболее простую конструкцию имеют участки ошиновки между электрическими аппаратами. Провода крепятся на изоляторах электрических аппаратов, имеющих большую жесткость на изгиб. В качестве расчетной модели для оценки динамики указанного участка при коротком замыкании (КЗ) можно использовать гибкую упругую нить с малой стрелой провеса, закрепленной на неподвижных опорах. Для определения параметров движения проводов участка могут быть использованы обобщенные зависимости максимальных отклонений и тяжений от динамического критерия подобия, полученные с использованием теории подобия из решения уравнений движения гибкой нити в безразмерной форме.

Сборные шины вместе с отпайками и гирляндами изоляторов образуют сложную пространственную систему, расчет электродинамической стойкости которой возможен только с использованием компьютерных программ, в которых реализован алгоритм численного решения уравнений движения системы взаимосвязанных проводов в виде гибких упругих нитей под действием электродинамических усилий.

Для предварительной оценки сближений гибких шин и спусков может быть использован метод определения их предельно возможного отклонения только по геометрическим размерам пролета сборных шин, который позволяет оценить возможность опасного сближения гибких шин и спусков без привязки к конкретному току КЗ.

Провода пролетов ячейки, как правило, не имеют спусков к электрическим аппаратам и крепятся к порталам натяжными гирляндами изоляторов. Расчет параметров их электродинамической стойкости рекомендуется выполнять упрощенным явным методом расчета. Он базируется на модели физического маятника, энергетическом и интегральном принципах механики. Для повышения точности расчета по упрощенному методу он улучшен поправочными коэффициентами.

Таким образом, сочетание численных и упрощенных методов позволяет с наименьшими затратами выполнить расчет электродинамической стойкости различных участков гибкой ошиновки распределительных устройств электростанций и подстанций.

Математическая модель блока генератор-трансформатор для исследования переходных процессов на сборных шинах

ИГНАТЬЕВ А.А.

Белорусский национальный технический университет

Расчет токов КЗ на сборных шинах высокого напряжения (ВН) блочной электростанции, в виду близости к синхронным генераторам, рекомендуется выполнять путем совместного решения дифференциальных уравнений, описывающих синхронный генератор и блочный трансформатор.

Наиболее распространенной и удобной математической моделью синхронного генератора являются уравнения Парка-Горева с одной обмоткой возбуждения и двумя эквивалентными демпферными обмотками в продольной и поперечной осях ротора [1]. Необходимо отметить, что основным недостатком данного способа задания синхронного генератора является сложность определения таких параметров генератора, как взаимдуктивности обмотки статора с обмотками ротора, взаимдуктивности обмоток ротора.

В основу нелинейной математической модели двухобмоточного блочного трансформатора, так как он рассматривается совместно с синхронным генератором, должно быть положено расщепление магнитного потока на основной магнитный поток, общий для обеих обмоток, и потоки рассеяния сцепленные с отдельными обмотками и замыкающиеся вне сердечника. Поскольку протекающие процессы в ферромагнитных элементах обусловлены нелинейностью характеристик намагничивания, то дифференциальные уравнения, описывающие блочный трансформатор, дополняются аппроксимированной кривой намагничивания [2].

Таким образом, совместное рассмотрение математических моделей синхронного генератора и двухобмоточного трансформатора представляет собой математическую модель блока генератор трансформатор, с помощью которой можно рассматривать переходные процессы различного характера (наибольший интерес представляют переходные процессы на сборных шинах ВН). Однако следует отметить, что при численном решении системы дифференциальных уравнений, в частности методом Рунге-Кутты, возникает потребность в применении специальных методов для сходимости итерационного процесса.

Литература

1. Важнов, А.И. Основы теории переходных процессов синхронной машины / А.И. Важнов. – М.: Л.: Госэнергоиздат, 1960.
2. Новаш, В.И. Математические модели для исследования переходных процессов и оценки поведения устройств релейной защиты: дис.... доктора техн. наук: 05.14.02 / В.И. Новаш. – Минск, 1973.

Результат математического моделирования упрощённой модели векторного гистерезиса

ТОЛМАЧЁВ С.Т., ИЛЬЧЕНКО А.В., БАТРАКОВ Д.В.
Криворожский технический университет

Гистерезис каждой микрочастицы описывается трансцендентным тригонометрическим уравнением, поэтому основное время при расчёте вектора намагниченности макрообъёма вещества затрачивается на решение этого уравнения. Исключение из расчёта решения уравнения методом половинного деления значительно сокращает число вычислительных операций.

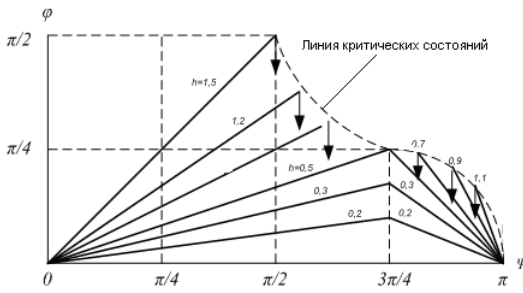


Рис. 1

Это можно осуществить путём аппроксимации множества его решений (рис. 1).

На рисунке показаны устойчивые состояния угла $\varphi(h, \Psi)$ в локальной системе координат. Это область обратимых состояний. «Скачек» угла φ возможен

только по достижению линии критических состояний. Из рисунка видно, что «переброс» никогда невозможен при $|\Psi| \leq \frac{\pi}{2}$. Это условие надо ставить первым при определении состояния ОЛН частицы. Знак угла φ всегда совпадает со знаком угла Ψ .

В результате математического моделирования упрощённой математической модели векторного гистерезиса получена зависимость вектора намагниченности от напряжённости внешнего магнитного поля.

Время расчёта упрощённой модели векторного гистерезиса, исключаящей решение трансцендентного уравнения, сокращается примерно в 2 раза.

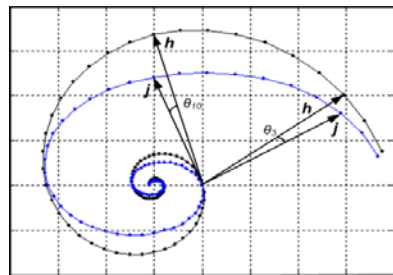


Рис. 2. Результат моделирования векторной гистерезисной характеристики – годограф $j(h)$

СЕКЦИЯ 2. Электрические системы

УДК 621.311

Устойчивость асинхронных генераторов мини-ТЭЦ промышленных предприятий

Филипчик Ю.Д.

Белорусский национальный технический университет

Создание генерирующих установок мини-ТЭЦ на местных видах топлива в Республике Беларусь является одним из приоритетных направлений экономии топливно-энергетических ресурсов и повышения энергетической безопасности страны. В качестве генерирующих источников применяются не только синхронные, но и асинхронные генераторы с короткозамкнутой обмоткой ротора и конденсаторным возбуждением.

Выполнена оценка устойчивости асинхронного генератора мини-ТЭЦ промышленного предприятия номинальной мощностью 2200 кВт подключенного через разделительный трансформатор к секции шин низшего напряжения подстанции 110/10 кВ.

Оценка устойчивости выполнена на ЭВМ с использованием программного комплекса расчета установившихся и переходных электромеханических процессов.

Уровень статической устойчивости оценивался путем расчета коэффициента запаса по напряжению:

$$K_U = \frac{U_0 - U_{кр}}{U_0},$$

где U_0 – напряжение в узле нагрузки в исходном рассматриваемом режиме; $U_{кр}$ – критическое напряжение в том же узле, соответствующее границе статической устойчивости асинхронного генератора.

Величина коэффициента запаса по напряжению асинхронного генератора удовлетворяет нормативным требованиям ($K_{Ун} = 0,15$ о.е.) для всех рассмотренных схем выдачи мощности и режимов.

Для нормальной и ремонтной схемы выдачи мощности выполнена оценка динамической устойчивости генератора мини-ТЭЦ. По результатам расчетов найдены предельные время отключения различных нормативных видов возмущений, а также определена возможность включения генератора станции после перерыва электроснабжения посредством работы автоматики повторного включения питающей линии 110 кВ.

Составление балансов электроэнергии в сетях структурных подразделений ОЭС Беларуси

ФУРСАНОВ М.И., ЗОЛОТОЙ А.А., МАКАРЕВИЧ В.В.
Белорусский национальный технический университет

Балансы электроэнергии на любом объекте, уровне электрических сетей или энергоподразделении энергосистемы определяются в виде равенства поступления и расхода электрической энергии:

$$W_{\text{пс}} = W_{\text{ос}} + \Delta W ,$$

где $W_{\text{пс}}$ и $W_{\text{ос}}$ – поступление и отпуск электроэнергии; ΔW – отчётные потери.

Для выделения электроэнергии, отпущенной беспотерным потребителям, используется понятие пропуска электроэнергии $W_{\text{прс}}$, по отношению к которому вычисляются относительные значения отчетных потерь электроэнергии:

$$\Delta W_{\%} = \frac{\Delta W}{W_{\text{прс}}} \cdot 100 .$$

Поступление электроэнергии $W_{\text{пс}}$ в сети энергосистем и их структурных подразделений рассчитывается по формуле:

$$W_{\text{пс}} = W_{\text{ош}} + W_{\text{пок}} ,$$

где $W_{\text{ош}}$ – объёмы электроэнергии, отпущенной с шин электростанций, которые принимаются на основании актов о составлении баланса электроэнергии на электростанциях; $W_{\text{пок}}$ – электроэнергия, полученная от энергоисточников, находящихся на балансе потребителей, в том числе от блок-станций, а также приобретенная на рынке перетоков электроэнергии, зафиксированная коммерческими приборами учета.

Отпуск электроэнергии $W_{\text{ос}}$ из сетей энергосистем и их структурных подразделений рассчитывается по формуле:

$$W_{\text{ос}} = W_{\text{по}} + W_{\text{пн}} + W_{\text{прод}} + W_{\text{э}} ,$$

где $W_{\text{по}}$ – полезно отпущенная электроэнергия собственным потребителям, зафиксированная коммерческими приборами учета; $W_{\text{пн}}$ – расход на производственные нужды энергосистемы; $W_{\text{прод}}$ – электроэнергия, переданная избыточными энергосистемами на рынок перетоков электроэнергии, зафиксированная коммерческими приборами учета (для дефицитных энергосистем $W_{\text{прод}} = 0$); $W_{\text{э}}$ – экспорт электроэнергии.

Учет демпфирования при математическом моделировании синхронных машин

Золотой А.А., Будько А.А.

Белорусский национальный технический университет

Большинство установленных на электрических станциях синхронных генераторов имеют демпферные обмотки, которые уменьшают амплитуду колебаний ротора и влияют на динамическую устойчивость синхронных машин. Поэтому учёт демпферных обмоток в математических моделях синхронных машин является обязательным.

Наилучшее математическое описание электромеханических переходных процессов, происходящих в синхронной машине с продольными и поперечными демпферными контурами, дают математические модели на основе полных уравнений Парка-Горева.

В матричном виде, система дифференциальных уравнений неустановившегося режима явнополюсной синхронной машины с одним продольным контуром возбуждения и двумя демпферными контурами по продольной и поперечной осям на роторе записанная в d , q , 0 координатах и приведенная к форме Коши имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} [L] \frac{d}{dt} [i] - [E] + \left([R] + \frac{d\gamma}{dt} [M] \right) [i] &= 0; \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \omega; \\ \frac{d^2\gamma}{dt^2} &= \frac{1}{J} \left[M_m - \frac{3}{2} \left[(L_d i_d + M_d i_r + M_d i_{rd}) i_q - (L_q i_q + M_q i_{rq}) i_d \right] \right]. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Переменными, определяющими режим работы синхронной машины, являются i_d , i_q , i_r , i_{rd} , i_{rq} и γ .

Решение системы (1) можно получить в математическом пакете MatLab с помощью функции-решателя ode15s, в которой реализован многошаговый метод переменного порядка, использующий формулы численного дифференцирования. Начальные условия для решения системы (1) определяются из параметров установившегося режима схемы электрической сети и параметров схемы замещения синхронной машины. Токи i_{rd} и i_{rq} продольного и поперечного демпферных контуров в установившемся режиме синхронной машины равны 0.

**Технология выделения энергоблоков
на нагрузку энергорайона электрической сети
при воздействии противоаварийной автоматики**

Филипчик Ю.Д., Калентионов Е.В.

Белорусский национальный технический университет

Технологическая независимость агрегатов блочных электростанций создает благоприятные возможности для их выделения в аварийных условиях противоаварийной автоматикой с нагрузкой наиболее ответственных потребителей ближайшего энергорайона электрической сети. Противоаварийная автоматика выделяет один или несколько энергоблоков путем отключения связей на самой электростанции и (или) примыкающих подстанциях. При этом должна быть обеспечена и экспериментально проверена надежная работа энергоблоков в таких условиях в течение не менее 10–15 минут при различных режимах и технических схемах электростанции.

Схема регулирования энергоблоков должна обеспечивать их выделение в аварийных условиях на изолированную несбалансированную нагрузку. Перевод собственных нужд электростанции на резервные трансформаторы осуществляется с использованием стандартной схемы автоматического ввода резерва, подающей импульс на включение резервного ввода после отключения рабочего ввода или технологии быстродействующего автоматического ввода резерва. При этом бестоковая пауза сводится до минимума за счет подачи импульса от автоматики частотного деления на включение резервного ввода еще до отключения рабочего. Это существенно облегчает условия самозапуска, уменьшает отклонения режимных параметров, увеличивает мощность переводимых собственных нужд. Собственные нужды выделяемого блока на резервный трансформатор не переводятся, а получают питание от своего рабочего трансформатора.

Выделение энергоблока осуществляется на примерно сбалансированную нагрузку энергорайона. Для этого желательно обеспечить непрерывное слежение за положениями коммутационных аппаратов в схеме, числом работающих энергоблоков, включенных линий электропередачи, автотрансформаторов связи, значением мощности энергоблоков, потребляемых мощностей в выделяемой части энергосистемы. Для уменьшения небаланса между генерацией и потреблением в выделенном районе целесообразно использовать отключение или дополнительное включение потребителей. При этом необходимо стремиться к минимальному числу срабатываний выключателей.

Учет повторного заземления нулевого провода при расчёте режимов и потерь в электрических сетях 0,38 кВ

Фурсанов М.И., Золотой А.А., Макаревич В.В.
Белорусский национальный технический университет

На практике часто приходится выполнять расчёты режимов, как существующих, так и проектируемых электрических сетей 0,38 кВ.

Расчёт режима, как правило, производится упрощённо и не учитывает влияние повторных заземлений нулевого провода (ПЗНП), которые согласно ПУЭ должны устанавливаться на концах воздушных линий, ответвлениях от ВЛ длиной более 200 м и на вводах от ВЛ к электроустановкам, подлежащих занулению. По условиям защиты от грозových перенапряжений могут осуществляться и более частые заземления.

Учёт ПЗНП приводит к появлению в схеме замещения (СЗ) дополнительных ветвей, связывающих нулевой провод с землёй и создают в схеме контуры. Топология сети нулевого провода становится замкнутой. Учитывая низкую достоверность режимной информации о потребителях и невысокое напряжение сети растеканием токов нулевой последовательности в земле можно пренебречь и землю заменить узлом сети, соединённым с нулевым проводом ветвями, имитирующими заземляющие устройства.

Для расчёта режима сети нулевого провода с учётом ПЗНП предлагается метод узловых напряжений. Режимной информацией в узлах сети являются токовые инъекции, при этом система уравнений узловых напряжений становится линейной и однозначно разрешимой относительно напряжений узловых точек СЗ:

$$\underline{\mathbf{Y}}_v \underline{\mathbf{U}} = \underline{\mathbf{I}}, \quad (1)$$

где $\underline{\mathbf{Y}}_v$ – комплексная матрица собственных и взаимных узловых проводимостей; $\underline{\mathbf{U}}$ и $\underline{\mathbf{I}}$ – векторы-столбцы комплексов узловых напряжений и токов.

В системе уравнений (1) неизвестными являются узловые напряжения сети нулевого провода. Так как уравнения системы (1) линейны и большинство недиагональных элементов матрицы $\underline{\mathbf{Y}}_v$ равны нулю, то для решения системы (1) эффективны точные методы с оптимальной стратегией исключения неизвестных, например метод Гаусса.

Учёт ПЗНП оказывает влияние на параметры режима и потери мощности в сети 0,38 кВ, причём сила влияния пропорциональна степени несимметрии токов нагрузки фаз и обратно пропорциональна сопротивлению заземляющих устройств и заземлителей.

Совместное решение дифференциально-алгебраических уравнений при математическом моделировании электромеханических переходных процессов в электроэнергетических системах

ЗОЛОТОЙ А. А., КУНЦЕВИЧ А. И.

Белорусский национальный технический университет

Система дифференциальных уравнений синхронной машины с одним контуром на роторе, описывающая электромеханические переходные процессы имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} (\rho_0 + p)x_0 i_0 &= -e_0; \\ (\rho_d + p)x_d i_d + (1 + s)x_q i_q + p\omega_s M_d i_r &= -e_d; \\ -(1 + s)x_d i_d + (\rho_q + p)x_q i_q - (1 + s)\omega_s M_d i_r &= -e_q; \\ \mu p x_d i_d + (\rho_r + p)\omega_s M_d i_r &= M_d e_r / L_r; \\ \omega_s^2 J \dot{s} + 1.5(\omega_s M_d i_r i_q + (x_d - x_q)i_d i_q) &= \omega_s M_m. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Реакция электрической сети при электромеханических переходных процессах в энергосистеме описывается системой алгебраических уравнений:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{i1} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_i \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ \vdots \\ J_i \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где Y_{ii} – собственная проводимость i -го узла; Y_{ij} – проводимость ветви, связывающей i -й узел с j -м; U_i и J_i – напряжение и узловый ток в i -м узле.

Связь между системами (1) и (2) осуществляется с помощью преобразования:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Re}(J_i) &= i_{qi} \cos \theta - i_{di} \sin \theta; \\ \operatorname{Im}(J_i) &= i_{qi} \sin \theta + i_{di} \cos \theta, \end{aligned} \right\}$$

где θ – угол между поперечной осью синхронной машины и синхронной осью системы; i_{di} – продольный ток i -го генератора; i_{qi} – поперечный ток i -го генератора.

СЕКЦИЯ 3. Электроснабжение

УДК 621.32

Определение экономической целесообразности применения светодиодных источников света

Козловская В.Б., Гаврилович Д.А., Перемотова О.Н.
Белорусский национальный технический университет

Светодиодные источники света имеют ряд преимуществ по сравнению с привычными лампами накаливания, галогенными и люминесцентными лампами. Благодаря своей экономичности и эффективности, светодиодные светильники существенно потеснили позиции традиционного осветительного оборудования. Показатели светоотдачи достигают 145 лм/Вт. Для сравнения, люминесцентная лампа выдает не более 80 лм/Вт. Кроме того, данные светильники могут выдавать, при необходимости, излучение любого цвета. Срок эксплуатации светодиодных светильников достигает 100 тысяч часов. Они обладают высокой механической прочностью и надежностью, поскольку в них отсутствует такой хрупкий и ненадежный элемент как стеклянная колба. Световое оборудование на базе светодиодов – легкое, компактное, оно удобно при установке и эксплуатации.

Внедрение светодиодов, становится одним из самых перспективных направлений на рынке осветительной техники. Сейчас пятая часть всей мировой электроэнергии расходуется на освещение. Широкое применение светодиодного оборудования позволит существенно сократить этот показатель за счет высокого коэффициента полезного действия этих светильников.

Как показали произведенные расчеты, замена светильников с газоразрядными лампами на светодиодные в системе освещения общедомовых помещений ЖКХ и цехов промышленных предприятий позволяет снизить потребление электроэнергии более чем в 2 раза. Высокая стоимость светодиодных изделий обуславливает значительные капитальные затраты, однако эксплуатация их значительно дешевле, что связано со значительно большим сроком службы и меньшим потреблением электроэнергии. Поэтому приведенные затраты при использовании светодиодных источников света меньше, чем при применении газоразрядных ламп. Аналогичные результаты получены и при оценке эффективности перехода на светодиодные источники света методом чистого дисконтированного дохода.

Контроль аварийных перегрузок высоковольтного оборудования

АНИЩЕНКО В.А., АДАМЦЕВИЧ В.А.

Белорусский национальный технический университет

Действующие стандарты регламентируют длительности кратковременных аварийных перегрузок высоковольтного оборудования: турбогенераторов, синхронных компенсаторов, силовых трансформаторов, кабельных линий, выключателей, реакторов, высокочастотных заградителей, трансформаторов тока – по току в зависимости от их кратностей. При этом предполагается постоянство кратности перегрузки в ходе аварии. Однако она может изменяться, что приводит к недопустимому перегреву оборудования или недоиспользованию его перегрузочной способности. Превышенные температуры токоведущих элементов и их изоляции над температурой охлаждающей среды в зависимости от времени имеет вид:

$$\tau = \tau_y - (\tau_y - \tau_n) \exp(-t/T),$$

где τ_y – установившееся превышение температуры; τ_n – начальное, постоянное в процессе аварии, превышение температуры; T – постоянная времени нагрева оборудования.

Непосредственность определить из этого уравнения допустимую длительность перегрузки невозможно, т. к. в рассматриваемой задаче величины τ_n и τ_y могут непрерывно изменяться.

Допустимую длительность переменной перегрузки предлагается определять следующим образом:

$$t_n = -T \cdot \ln \left(\frac{K_n(t) - K_{n, \text{доп}}}{K_n(t) - \bar{K}_n(t)} \right),$$

где $K_n(t)$ – кратность перегрузки в текущий момент времени; $K_{n, \text{доп}}$ – кратность перегрузки, соответствующая допустимому перегреву оборудования при перегрузке; $\bar{K}_n(t)$ – осредненная кратность перегрузки, соответствующая текущему превышению температуры:

$$\bar{K}_n(t) = \alpha K_n(t) - (1 - \alpha) \bar{K}_n(t - h),$$

h – интервал временной дискретизации; α – параметр сглаживания, определяемый при $T \gg h$ как

$$\alpha = 1 - \exp(-h/T).$$

Учет переменного характера кратковременных перегрузок повысит надежность оборудования в аварийных условиях работы.

Достоверность дублированных измерений

АНИЩЕНКО В.А.

Белорусский национальный технический университет

Необходимость дублирования ответственных измерений в энергосистемах (в 1-ую очередь – на атомных электростанциях) вызывается большим ущербом, в т. ч. экологическим, к которому может привести недостоверная информация о контролируемых переменных.

Условие достоверности дублированных измерений x_1 и x_2 имеет вид

$$|x_1 - x_2| \leq \delta_{\text{доп}},$$

где допустимая невязка $\delta_{\text{доп}}$ зависит от величины квантили k , определяющей степень усечения кривой распределения плотности невязки, и расчетных дисперсий случайных погрешностей измерений 1-ым и 2-ым приборами D_1 и D_2 :

$$\delta_{\text{доп}} = k\sqrt{D_1 + D_2}.$$

Сложность задачи контроля достоверности дублированных измерений связана с неопределенностью, возникающей при выборе величины квантили k . Первая причина этой неопределенности – онтологическая. Она обусловлена несоответствием фактической точности средств измерений расчетным (паспортным) данным, неточным знанием законов распределений погрешностей измерений и законов распределения измеряемых переменных. Вторая причина неопределенности – гносеологическая, обусловленная размытостью понятия грубой, т. е. недопустимо большой погрешности измерения. Невозможность однозначной формализации этого исходного понятия ведет к субъективным решениям о достоверности или недостоверности показаний измерительных приборов. Уменьшение квантили k приводит к росту необоснованных решений о недостоверности одного из измерений, увеличение – к росту необоснованных решений об отсутствии недостоверного измерения.

Предлагается производить коллективный контроль достоверности дублированных измерений на основе трех диагностических признаков. Первый признак обеспечивает инвариантность устраняемых «хвостов» различных распределений погрешностей измерений. Второй и третий признаки учитывают диапазон возможных значений контролируемой переменной. Окончательное решение о достоверности измерений переменной принимается в соответствии с логической схемой «И».

Надежность резервированных систем с тремя состояниями

АНИЩЕНКО В.А.

Белорусский национальный технический университет

Системы с тремя состояниями формируются из элементов, которые могут находиться в одном из трех состояний: исправном, иметь отказы вида «обрыв» или «замыкание». Типичными примерами являются релейная защита и противоаварийная автоматика, различные электронные устройства, регулируемые клапаны, изменяющие расходы жидкостей, пара, газа.

Надежность систем можно повысить, применяя более надежные, но дорогие элементы, и путем их структурного резервирования. Элементы с тремя состояниями могут образовывать различные схемы резервирования: с последовательным, параллельным, последовательно-параллельным, параллельно-последовательным и смешанным соединением элементов. Выбор оптимальной схемы предлагается производить по критерию

$$F_j = P_0 \Delta P_j - n_j c = \max; \quad j = 1, \dots, m,$$

где P_0 – относительное приращение производственного эффекта от повышения надежности на одну относительную единицу; ΔP_j – повышение вероятности безотказной работы устройства в результате резервирования; n_j – число резервных элементов; c – стоимость одного элемента; m – число рассматриваемых схем резервирования.

Вероятности безотказной работы схем определяются по выражениям, основанным на биномиальном разложении

$$(p + q_0 + q_s)^{(n_j+1)} = 1,$$

где p – вероятность безотказной работы одного элемента; q_0 и q_s – вероятности его отказов видов «обрыв» и «замыкание».

Последовательное и параллельное дублирование элемента с равновероятными отказами не влияет на вероятность безотказной работы устройства, но приводит к перераспределению вероятностей равноименных отказов. Поэтому дублирование имеет смысл только для устройств, на надежность которых влияют отказы одного определенного вида. В устройствах релейной защиты и противоаварийной автоматики перспективны мажоритарные схемы резервирования «2 из 3» с двумя и «3 из 5» с четырьмя дополнительными промежуточными реле. Они существенно повышают надежность в отношении как замыкания, так и размыкания электрической цепи. Построена номограмма, определяющая области эффективности применения мажоритарных резервированных схем.

К вопросу оценки энергобезопасности

ПОСПЕЛОВА Т.Г.

Белорусский национальный технический университет

Необходимость оценки энергобезопасности возникает при прогнозировании и планировании социально-экономического развития страны. Следует различать две компоненты оценки. Первая компонента использует индикативный анализ. Вторая компонента оценки – определение необходимых ресурсов (материальных, финансовых, трудовых и т. д.) в денежном выражении. Если энергобезопасность оценивается как составляющая национальной безопасности, то учитывается инфраструктурная роль топливно-энергетического комплекса, влияние на конкурентоспособность продукции, а также внешнеполитическое и внешнеэкономическое значение энергетики. В этом случае, чтобы определить, сколько стоит энергобезопасность, следует произвести оценку достижения заданных значений индикативных показателей по основным направлениям энергобезопасности (диверсификация энергоносителей, их поставщиков, источников генерации, развитие большой и малой энергетики, включая возобновляемую, энергосбережение) для альтернативных вариантов по каждому направлению. Имеет место и более узкое понимание оценки энергобезопасности как достаточности обеспечения топливно-энергетическими ресурсами. В настоящее время в стране используется программно-целевой подход. При этом не учитывается изменение источников и механизмов финансирования в условиях перехода к рыночной экономике. Сегодня потребности в финансах, продиктованные «сверху», должны сопрягаться с заинтересованностью и возможностями бизнес-групп, т. е. «снизу», по каждому направлению повышения энергобезопасности. Финансовая оценка включает мониторинг наличия ресурсов и источников денег на локальных уровнях (области, районы), так как здесь развивается децентрализованная энергетика и финансирование определяется заинтересованностью, финансовой активностью на этих уровнях. В денежном выражении затраты на энергобезопасность включают стоимость инвестиционных проектов и привлеченных средств в сферу энергетики и энергоэффективности. Процедуры оценки затрат следует осуществлять параллельно: системно «сверху» – для стратегических мероприятий и экспертно для совокупности мелких и организационных и «снизу» – на основе технико-экономических расчетов.

Об алгоритмизации выбора типов трансформаторных подстанций 6–20/0,4 кВ

РАДКЕВИЧ В.Н., СТАЛОВИЧ В.В.

Белорусский национальный технический университет

Для электроснабжения электроприёмников напряжением до 1 кВ производственных и коммунально-бытовых потребителей применяются трансформаторные подстанции (ТП) с высшим напряжением 6–20 кВ. Они могут быть как с распределительными устройствами (РУ) на первичном напряжении, так и без них. На рынке электротехнической продукции предлагаются разные типы ТП, произведенных в РБ и за её пределами. Правильный выбор ТП влияет на технические, экономические и эксплуатационные показатели системы электроснабжения. На промышленных предприятиях, в конечном счете, это сказывается на себестоимости продукции.

При выборе ТП необходимо учитывать множество факторов и использовать разнообразную исходную и нормативно-техническую информацию. Необходимо знать схемы и конструктивное исполнение электрических сетей, присоединяемых к ТП на первичном и вторичном напряжениях, стоимостные показатели и характеристики надежности элементов системы электроснабжения, массогабаритные данные ТП и т. д. Часть исходной информации носит неопределённый характер и требует многовариантных расчетов. Это вносит определенные трудности в работу проектировщиков и затягивает процесс проектирования.

Повышение эффективности интеллектуального труда и качества принимаемых проектных решений можно достичь путем рационализации и автоматизации процесса обработки информации на основе компьютерных технологий. Для этого необходимо разработать алгоритм и компьютерную программу решения данной задачи. Предварительно, в соответствии с ГОСТ 19701-90 (ИСО 5807-85) «Схемы алгоритмов, программ, данных и систем», разработана схема данных, необходимых при выборе типа ТП. Эта схема отображает путь данных при решении задачи, определяет этапы их обработки, а также применяемые носители информации. В схеме указываются процессы обработки данных и потоки данных между процессами. Составленная схема позволяет формализовать процесс принятия решений и разработать алгоритм компьютерной программы выбора подстанций напряжением 6–20/0,4 кВ, применяемых в системах электроснабжения производственных объектов и городов.

Основные пути экономии электроэнергии в осветительных установках

РАДКЕВИЧ В.Н., КОЗЛОВСКАЯ В.Б., КОЛОСОВА И.В.
Белорусский национальный технический университет

В соответствии с определением, принятом на международной энергетической конференции (МИРЭК) ООН, экономия энергии – это эффективное использование энергоресурсов за счет применения инновационных решений. Принимаемые решения должны быть технически осуществимы, экономически обоснованы, приемлемы с экологической и социальных точек зрения, а также не изменять привычного образа жизни людей. С учетом сформулированных требований следует рассматривать возможные способы и средства экономии электроэнергии в осветительных установках.

Повышение эффективности использования электроэнергии на освещении сводится к решению следующих основных задач:

- повышение качества проектирования систем электрического освещения на основе современных нормативно-технических документов с учетом достижений научно-технического прогресса в электрическом освещении;
- совершенствование световых приборов и повышение качества изготовления светотехнических изделий;
- повышение экономичности систем электрического освещения путем использования энергетически эффективных световых приборов;
- совершенствование способов искусственного освещения с учетом максимального использования естественного света;
- повышение уровня эксплуатации осветительных установок;
- совершенствование способов и средств управления осветительными установками;
- обеспечение требуемого качества напряжения, подводимого к контактам световых приборов;
- стимулирование потребителей электроэнергии за применение энергосберегающих источников света;
- повышение уровня энергетической культуры населения.

При технико-экономическом обосновании мероприятий по энергосбережению необходимо учитывать стоимость, срок службы, надежность работы и другие характеристики световых приборов, пускорегулирующих аппаратов и устройств управления освещением, эксплуатационные расходы, а также затраты на демонтаж старого оборудования и монтаж новых осветительных установок.

Сравнительная оценка эффективности использования электрических источников света

КОЗЛОВСКАЯ В.Б., РАДКЕВИЧ В.Н.

Белорусский национальный технический университет

При выборе источников света руководствуются некоторыми критериями целесообразности их применения. Важнейшим показателем экономичности электрических ламп является световая отдача, которая выражается в лм/Вт. Световая отдача характеризует экономичность источника света по энергозатратам. Она повышается с увеличением номинальной мощности для всех типов ламп. Однако эта интегральная характеристика не дает полного представления о целесообразности применения того или иного источника света для электрического освещения. Действительно, источник света может иметь меньшую световую отдачу, но при этом обладать другими преимуществами, например, быть дешевым, экологически безопасным или иметь больший срок службы. Может быть и противоположная ситуация. Например, световая отдача источника света достаточно высокая, однако из-за его значительной стоимости и определенного консерватизма людей источник света может иметь ограниченное применение. Это является сдерживающим фактором широкого использования световых приборов на основе светодиодов и компактных люминесцентных ламп вместо ламп накаливания бытовыми потребителями электроэнергии.

В ряде случаев при оценке эффективности источников света используется мультипликативный критерий, представляющий собой произведение световойдачи и средней продолжительности работы, выраженный в лм·ч/Вт. Численное значение данного критерия иногда интерпретируют как количество световой энергии, вырабатываемой источником света за срок его службы, на один условный ватт. Указанный критерий позволяет более объективно оценить эффективность и целесообразность применения того или иного источника света. Он показывает, что с учетом продолжительности срока службы наиболее эффективными являются источники света на основе светодиодов. Люминесцентные лампы низкого давления остаются одними из наиболее экономичных источников света. Лампы типа ДРИ, имеющие высокую световую отдачу и лучшую цветопередачу по сравнению с лампами типа ДРЛ, в долгосрочной перспективе из-за меньшего срока службы и большей стоимости уступают им по эффективности применения.

Расчет осветительных сетей низкого напряжения

КАБАНОВ А.А., САЦУКЕВИЧ В.Н., СИДОРОВ А.Г.

Белорусский национальный технический университет

Питание галогенных ламп накаливания в существующих установках осуществляется как при сетевом, так и при пониженном напряжении от трансформаторов. Пониженное напряжение позволяет при той же потребляемой мощности достигнуть более высокого уровня освещённости, однако из-за больших токов и высокой чувствительности галогенных ламп в нормальном режиме к величине подводимого напряжения важен выбор сечений проводников и расчёт сети по допустимой потере напряжения.

Цель настоящей работы состоит в определении влияния параметров элементов осветительной сети пониженного напряжения и её конфигурации на эффективность применения светильников с такими лампами. В качестве источника питания рассматривается электронный трансформатор, работающий от сети на напряжении 220 В промышленной частоты. На выводах вторичной обмотки получается напряжение 12 В с частотой 25–50 кГц.

Сеть с соединением ламп по схеме кольца при расчете представлена как линия с двухсторонним питанием. Расчёт сети по схеме звезды произведён как для линии с односторонним питанием и сосредоточенной нагрузкой. В качестве примера приведен также расчет сети с учетом влияния нагрева проводников на их сопротивление и соответственного увеличения потерь. Использование метода моментов и уравнений теплового баланса позволяет произвести точный расчет осветительной сети и осуществить правильный выбор проводников.

Расчет сети из шести ламп мощностью по 50 Вт показывает целесообразность подключения источников света к трансформатору с помощью двух линий, по 3 лампы в каждой. При расстоянии между лампами 2 м и медном проводе сечением 2,5 мм² допустимое удаление ближайшей лампы от трансформатора составляет 1,17 м, а для линии с одной лампой это расстояние равняется 9,5 м.

Таким образом, по результатам произведенных расчетов можно говорить о том, что при проектировании систем электрического освещения с галогенными лампами накаливания следует учитывать нагрев проводов сравнительно большими токами и ориентироваться на указанные значения параметров электрической сети.

СЕКЦИЯ 4. Тепловые электрические станции

УДК 621.311

Построение алгоритмов контроля достоверности входных параметров информационной подсистемы в АСУ ТП ТЭС

НАЗАРОВ В.И., ПРОНКЕВИЧ Е.В.

Белорусский национальный технический университет

Алгоритмический модуль статической фильтрации основан на рекуррентной (итерационной) процедуре расчета, которая включает:

1. Расчет оценки математического ожидания \hat{M}_n измеряемого сигнала $X(n)$:

$$\hat{M}_n = \frac{n-1}{n} \hat{M}_{n-1} + \frac{1}{n} X(n),$$

где n – номер итерации или номер опроса устройством связи с объектом измерительного канала; $X(n)$ – значение измеряемой величины при n -ом опросе измерительного канала; \hat{M}_{n-1} – оценка математического ожидания параметра $X(n-1)$ при $(n-1)$ -ом опросе измерительного канала (при $n=1$ $\hat{M}_1 = X(1)$).

2. Определение оценки среднего квадратичного отклонения \hat{G}_n измеряемого сигнала

$$\hat{G}_n^2 = \frac{n-2}{n-1} \hat{G}_{n-1}^2 + \frac{1}{n-1} [X(n) - \hat{M}_n]^2.$$

3. Определение коэффициента λ_n , значение которого с вероятностью $p = 0,05$ не превышает разность $[X(n+2) - \hat{M}_n]$

$$\lambda_n = t_n \sqrt{\hat{G}_n^2}.$$

Если $\lambda_n < [X(n+1) - \hat{M}_n]$, то $(n+1)$ значение сигнала $X(n+1)$ подлежит исключению из ряда, как не заслуживающее доверия с вероятностью 95 %.

Литература

1. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.

Обоснование некоторых направлений повышения эффективности систем теплоснабжения и защиты окружающей среды

Карницкий Н.Б., Шкода А.Н.

Белорусский национальный технический университет

Анализ стратегий развития перспективных энергетических технологий по докладам Международного энергетического агентства (МЭА), концепции технического перевооружения электроэнергетики России, энергетического хозяйства Московского региона убедительно показывают, что оценка основных технико-экономических показателей инновационных разработок должна производиться только в тесной взаимосвязи с их экологическими показателями.

Так как теплофикация в странах с холодным климатом, при максимизации производства электроэнергии на тепловом потреблении, является самой значимой энергосберегающей технологией – в последнее время интерес к централизованному теплоснабжению возобновляется. При этом обеспечивается минимизация экологического воздействия электроэнергетики на жилые районы города, что определяет важность и возможность достижения поставленных целей в вопросах безопасности окружающей среды. Схемы централизованного теплоснабжения могут быть востребованы, например, в связи с программами продажи выбросов в некоторых странах, в то время как их основной конкурент – индивидуальное теплоснабжение – такими проектами не может быть охвачено.

Даже общий взгляд, без детального анализа, на результаты развития генерации в нашей стране показывает, что экологические показатели ввода новых генерирующих мощностей имеют второстепенное значение и не имеют достаточного научного сопровождения. О выходе нашей электроэнергетики, с точки зрения экологии, на уровень развитых стран мира можно говорить как об отдаленной перспективе.

Основной причиной ввода автономных котельных небольшой мощности даже в непосредственной близости от ТЭЦ является явное завышение стоимости отпускаемой теплоты, фактически субсидирующее выработку электроэнергии на тепловом потреблении. Такое завышение заставляет ряд потребителей отказываться от ТЭЦ как источника теплоты, что снижает термодинамическую эффективность самой ТЭЦ. Потребители, одновременно получающие тепловую и электрическую энергию от ТЭЦ должны получать выгоду в виде снижения тарифа на энергию. Необходимо также ввести кадастровый коэффициент при вводе автономных источников энергообеспечения, соответствующих экологическим требованиям места строительства (мегаполиса).

Сжигание местных видов топлива в промышленных котлах

ЖИХАР Г.И.

Белорусский национальный технический университет

Замещение местными видами топлива и горючими отходами производства импортируемых природного газа, нефтепродуктов и угля – одно из основных мероприятий Постановления Совета Министров Республики Беларусь от 7 декабря 2009 г. № 1593 «Об установлении заданий по доле местных топливно-энергетических ресурсов в балансе котельно-печного топлива».

Этим Постановлением установлены следующие задания по годам по Республике Беларусь:

2009 г. – 19,4 %; 2010 г. – 20,5 %; 2011 г. – 22,2 % и 2012 г. – 25 %.

В том числе по Минэнерго: %

	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.
ГПО «Белтопгаз»	45,2	45,7	47,5	48,0
ГПО «Белэнерго»	1,7	2,1	2,5	5,0
ОАО «Белтрансгаз»	3,8	4,0	4,2	4,5

В конце декабря 2009 г. введена в эксплуатацию Пружанская ТЭЦ мощностью 3,7 МВт с современной технологией сжигания древесного топлива и торфа. Для сжигания топлива применена коническая колосниковая решетка, разработанная финской фирмой. На Осиповичской мини-ТЭЦ также введена новая котельная установка для сжигания древесных отходов и фрезерного торфа.

Энергетическая котельная установка предназначена для выработки перегретого пара за счет сжигания древесного топлива и фрезерного торфа, как раздельно, так и в смеси в котлоагрегате КЕ-10-24-300 ОГМВ. На Осиповичской мини-ТЭЦ установлен блочный турбогенератор серии ТГ 1,5/10,5Р13/03.

Энергетические установки, работающие на местных топливах, построены и в других городах страны: Жодино, Вилейке, Бобруйске, Пинске. Сейчас необходимо определить самый эффективный проект. В перспективе будут еще построены десятки энергетических установок, работающих на местных топливах.

Особенности теплотехнических свойств местных видов топлив

КАРНИЦКИЙ Н.Б., ЗАМАРА С.М.

Белорусский национальный технический университет

К основным теплотехническим характеристикам топлива относят: содержание горючих веществ, влаги, минеральных примесей, балласт топлива, удельную теплоту сгорания, выход летучих веществ, свойства кокса, золы, физико-механические характеристики (плотность, прочность, сыпучесть, вязкость, температура вспышки и др.).

Древесное топливо – используется в основном в виде отходов (опилки, щепа). Характерные свойства: выход летучих веществ составляет 85 %. Для смешанного древесного топлива, при влажности 40 %, низшая теплота сгорания равна порядка 13400 кДж/кг, зольность не более 1 % на сухую массу, сера отсутствует.

Органические отходы деревообрабатывающих производств в виде гидролизного лигнина, получаемого при производстве спирта, практически не используются. Отвалы лигнина являются источником загрязнения атмосферного воздуха и грунтовых вод, при определенной влажности лигнин самовозгорается, а при дальнейшем высушивании становится взрывоопасен. По физическим свойствам лигнин близок к торфу, температура самовоспламенения 425 °С, зольность 3,75 %, влажность не более 60 %, теплота сгорания 6800 кДж/кг.

Фрезерный торф как продукт преобразования органического материала, главным образом наземных многоклеточных растений, в своей основной части состоит из гумусового вещества с более или менее значительной примесью неразложившихся остатков лигнина, целлюлозы и смол, входящих в состав растений.

Влажность свежееизвлеченного из залежи торфа обычно составляет 80–95 %. Зольность торфа в основном определяется условиями его залегания и колеблется от нескольких процентов до 10–19 %, рабочая влажность 48–53 %, выход летучих веществ составляет 70 %, содержание серы 0,3 %, низшая теплота сгорания 8100 кДж/кг, высокое содержание кислорода до 35 %. У торфа плохая сыпучесть, склонность к слеживанию, саморазогреванию и самовозгоранию, повышенная взрывоопасность, большая гигроскопичность, легкое смерзание.

Литература

1. Твердое энергетическое топливо / Б.С. Белосельский, В.К. Соляков. – М.: МЭИ, 1976.

Повышение эксплуатационной надежности рабочих лопаток последних ступеней теплофикационных турбин

ГЕРАСИМОВА А.Г., ВАСИЛЬЧЕНКОВА Е.Н.

Белорусский национальный технический университет

Ротора низкого давления мощных теплофикационных турбин часто подвергаются ремонту из-за возникновения различных дефектов в рабочих лопатках. Анализ дефектов лопаточного аппарата ЧНД турбин Т-250/300-240 показал, что наиболее подверженными износу участками являются рабочие лопатки последних ступеней. Типичными эксплуатационными повреждениями этих лопаток являются эрозионное изнашивание в сочетании с усталостью металла входных кромок лопаток и с отрывом стеллитовых пластинок. При этом наблюдается резкая неравномерность износа соседних лопаток при внешней идентичности условий их эксплуатации, что в свою очередь сказывается на ухудшении вибрационного состояния ротора. Следствием эрозии является снижение надежности лопаток и экономичности турбины.

Приведены оценки влияния эрозии на снижение экономичности, выполненные в предположительной линейной зависимости износа от времени, которые показывают, что ущерб от эрозии удваивается практически с каждым годом, что требует замены облапачивания после каждых 4–5 лет.

Проанализированы причины неравномерного эрозионного износа лопаток последних ступеней, зависящие от расстояния от отверстия под демпферную связь до выходной кромки лопатки, что особенно актуально для лопаток, прошедших восстановительный ремонт, т. к. в ряде случаев после ремонта ступени формируются из лопаток разных партий.

Рассмотрены способы снижения неравномерности эрозионного износа рабочих лопаток последних ступеней и существующие технологии восстановления эрозионно-изношенных лопаток.

Надежность лопаток последних ступеней можно обеспечить при соблюдении следующих условий:

- строгое поддержание параметров пара перед турбиной;
- обеспечение эффективной работы системы влагоудаления;
- установка при ремонте лопаток, отсортированных по геометрическому признаку;
- поддержание на должном уровне противоэрозионной защиты;
- обеспечение качественного мониторинга вибрационных параметров.

О путях реализации оптимального сжигания

ТАРАСЕВИЧ Л.А.

Белорусский национальный технический университет

Осуществление условий наибольшей полезной теплоотдачи продуктов горения включает следующие основные проблемы: наладка оптимального режима сжигания при данном способе сжигания; осуществление оптимального способа сжигания; технические средства оптимизации сжигания.

Эффективность оптимизации зависит от исходного режима сжигания. Теоретические исследования определяют направление поиска оптимальных решений. Как показывает практика, наибольший выигрыш реализуется заменой горелок или регулированием кривой выгорания при тех же горелках, поскольку они это позволяют. Следует отметить, что нормализованных горелок, для которых известны кривые выгорания, очень мало.

Опытный поиск оптимального режима сжигания остается в общем случае основным практическим средством. Целенаправленный анализ сравнительной эффективности разных воздействий на процесс горения может подчас дать больше, чем прямой оптимальный поиск.

Получены опытные кривые выгорания для горелок, обеспечивающих оптимальный режим сжигания в исследованных агрегатах.

Результаты показали, что максимальная полнота смещения – обязательное условие реализации оптимального способа сжигания и получить его можно в короткофакельной технике.

Существующие газовые горелки позволяют сжигать газ практически с любой интенсивностью. Более сложную техническую проблему представляет высокоинтенсивное сжигание тяжелого жидкого топлива. Использование жидкого топлива ставит проблему быстрого испарения. Пары и газообразные продукты термического разложения жидкого топлива смешиваются с окислителем, воспламеняются и выгорают аналогично газообразному топливу. Подготовка жидкого топлива к сжиганию заключается в распылении. Тонкое распыление тяжелого жидкого топлива обеспечивает быстрое испарение и достаточно малые размеры коксовых остатков.

Эффективность реализации оптимального сжигания зависит от наличия и правильного выбора топливосжигающих устройств, грамотно сконструированных, отлаженных, проверенных длительной эксплуатацией. Особое значение имеют проблемы короткофакельного сжигания, дожигания продуктов неполного сгорания, создания горелок с устойчивыми характеристиками.

Совершенствование схем подогрева сетевой воды для ТЭЦ

ТАРАСЕВИЧ Л.А.

Белорусский национальный технический университет

Эффективность повышения расчетной температуры в транзитных тепловых сетях (от ТЭЦ до пиковых котельных) определяется совокупностью противодействующих факторов: экономией капиталовложений и труб в тепловые сети, уменьшением располагаемой мощности турбин ТЭЦ и выработки электроэнергии на тепловом потреблении. Это объясняется повышением давления в регулируемых отборах и изменении распределения тепловой нагрузки между отборами. Повышение температурного графика приводит к сокращению расхода сетевой воды, который может оказаться существенно ниже номинального.

В настоящее время в практике эксплуатации применяется параллельная схема включения сетевых подогревателей по нагреваемой воде. Однако интерес представляют смешанная и универсальная схемы. Смешанная схема позволяет осуществить последовательно-параллельное включение сетевых подогревателей турбин, обеспечивая оптимальные расходы воды через сетевые подогреватели каждой турбины. Универсальная схема разработана с учетом блочной структуры компоновки оборудования и позволяет осуществить следующие схемы включений сетевых подогревателей и способы подогрева: параллельное, последовательно-параллельное и последовательное.

Для оценки эффективности применения вышеназванных схем проведена серия расчетов показателей ТЭЦ.

Анализ проведенных расчетов позволяет сделать ряд выводов:

1. Последовательно-параллельное включение сетевых подогревателей турбин в сочетании с понижением расчетного значения коэффициента теплофикации позволяет более широко и эффективно применять повышение температурного графика отпуска тепла от ТЭЦ.

2. Последовательное включение сетевых подогревателей для трех и более турбин осуществимо при реконструкции сетевых подогревателей, что позволяет значительно увеличить их пропускную способность по воде.

Литература

1. Пик, М.М. Выбор температурного графика регулирования отпуска теплоты в системах централизованного теплоснабжения / М.М. Пик, И.А. Смирнов, Р.Л. Ермаков // Теплоэнергетика. – 1974. – № 11. – С. 16–21.

Условия эффективного использования маневренных возможностей энергоустановок

КАЧАН С.А., БАРАНОВСКИЙ И.Н.

Белорусский национальный технический университет

Оптимизация режимов работы энергосистемы должна решаться комплексно с учетом структуры ее генерирующих мощностей и степени неравномерности графиков нагрузок. В связи с планируемым вводом АЭС, базовая мощность которой составит практически четверть всех установленных мощностей Беларуси, требуется пересмотреть критерии такой оптимизации.

Помимо тарифного стимулирования потребителей к выравниванию суточного графика нагрузок и создания специальных потребителей избыточной «ночной» энергии (гидроаккумулирующей станции (ГАЭС), электротельных и пр.) необходимо обосновать целесообразность и масштабы применения специализированных маневренных установок с учетом возможного повышения маневренных возможностей базисного оборудования.

При формировании тарифов основных электростанций при этом необходимо учитывать дополнительные затраты, связанные с привлечением установок к регулированию графиков нагрузок. Требуется переход к составлению суточного графика нагрузки электростанций по новому критерию: минимуму затрат на генерацию в энергосистеме, и разработка характеристик относительных приростов стоимости с учетом маневренности. То есть учет экономичности работы оборудования на частичных нагрузках и перегрузках (в зависимости от способа получения пиковой мощности), регулировочного диапазона, величины рабочей мощности (включенной с учетом «горячего» резерва и находящейся в «холодном» резерве), вынужденной сверхвыработки и недовыработки, приемистости и мобильности, потерь на стабилизацию переходных процессов и пуска из различного состояния, ускоренного технического износа оборудования вследствие их большей частоты, возможности и эффективности привлечения установок к автоматическому регулированию мощности энергосистемы и пр.

На действующем оборудовании необходимо проведение ремонтно-восстановительных работ и работ по реконструкции и модернизации, включая меры по повышению его маневренных возможностей, в том числе за счет использования газотурбинных и парогазовых технологий. При вводе новых энергоустановок необходимо технико-экономическое сопоставление различных типов электростанций с учетом их влияния на показатели энергосистемы.

Сравнение маневренных возможностей ПГУ разного типа

КАЧАН С.А., БАРАНОВСКИЙ И.Н.

Белорусский национальный технический университет

Утилизационные парогазовые установки (ПГУ), обеспечивают наиболее высокие показатели топливоиспользования (КПД в конденсационном цикле до 55–60 %), однако их маневренность сравнительно ограничена (невозможность обособленной работы паросиловой установки (ПСУ) от газотурбинной (ГТУ), глубина разгрузки не ниже ~60 % и пр.).

Надстройка ПСУ по сбросной схеме увеличивает диапазон регулирования примерно на 25–35 % при соответствующем повышении его нижней границы. Уровень разгрузки можно снизить практически до начального, соответствующего ПСУ, за счет специальных мер, обеспечивающих более устойчивую работу пароводяного тракта. Целесообразно сохранение ГТУ в работе во всем регулировочном диапазоне. При этом разгрузка преимущественно за счет ПСУ приводит к увеличению КПД ПГУ сбросного типа вследствие роста бинарности цикла. При отсутствии связей между воздушным трактом штатных горелочных устройств парогенератора и трактом выходных газов ГТУ возможны работа парогенератора в утилизационном режиме и независимый от паровой турбины пуск ГТУ, а также работа ГТУ на нагрузке собственный нужд ТЭС.

Реконструкция паросилового цикла установкой ГТУ с вытеснением регенерации и (или) с параллельной подачей пара из котла-утилизатора в промежуточную точку паровой турбины, обеспечивает наиболее высокую маневренность, при сравнительно небольших капвложениях. При этом удельная экономия топлива на единицу вводимой мощности ГТУ может даже превосходить утилизационные схемы (в случае надстройки блоков сверхкритического давления, особенно теплофикационных). При установке пиковых ГТУ на действующих ТЭС повышается не только экономичность дополнительной (пиковой) мощности, но и ее величина. При этом эффективным может быть применение ГТУ с повышенной степенью сжатия (до уже освоенных 30–40) с высоким КПД по выработке электроэнергии (до 40–45 %) и пониженной температурой сбросных газов.

Улучшение маневренности ПГУ возможно за счет применения дожигания в среде газов после ГТУ, энергетического впрыска пара в газовый тракт, применения аккумулялирования и др.

Оптимальная схема ПГУ должна соответствовать минимуму затрат на генерацию в энергосистеме с учетом числа часов использования оборудования, сроков ввода, требуемых инвестиций, стоимости топлива и пр.

О возможности применения теплонасосных установок при реконструкции энергетических объектов

Седнин А.В., Богданович М.Л.

Белорусский национальный технический университет

Проблема покрытия графиков электрической нагрузки характерна для любой энергосистемы. Теплофикационная система помимо теплоснабжения одновременно осуществляет функции электроснабжения. После ввода АЭС структура электрогенерирующих мощностей Республики Беларусь резко изменится, что потребует поставить в новые условия работу теплофикационных источников. В сложившейся ситуации актуальным является перевод отопительных котельных и ТЭЦ малой мощности, требующих замены отработавшего свой ресурс оборудования в теплонасосные станции (ТНС), состоящие из компрессионной теплонасосной установки (ТНУ) с газомоторным приводом, котла-утилизатора выхлопных газов и водогрейных котлов.

Размещение ТНУ на ТЭЦ может быть осуществлено в машинном зале, на месте демонтируемого паротурбинного оборудования. В такой ситуации необходимым условием модернизации является наличие низкопотенциального источника теплоты, которыми могут быть водооборотные циклы и водоочистные сооружения близлежащих промышленных предприятий, а так же естественные водоемы.

При переводе отопительных котельных в ТНС, достигаются две основные цели:

- снижается расход топлива непосредственно на источнике, т. к. ТНУ эффективнее, парового или водогрейного котлов;
- структура генерирующих мощностей энергосистемы не изменяется, т. к. нет отпуска электрической энергии в энергосистему.

Системная экономия топлива при переводе ТЭЦ в ТНС существенным образом зависит от КПЭ ТНУ, что накладывает определенные ограничения по выбору низкопотенциального источника теплоты. При определенных условиях перевод ТЭЦ в ТНС с газомоторным приводом может быть более эффективным, то есть достигается большее значение системной экономии топлива. Это характерно для тепловых двигателей с низким электрическим КПД.

Замечания по поводу использования местных видов топлив

Руденков Б.М

Белорусский национальный технический университет

Сначала об отходах деревоперерабатывающих предприятий. Конечно, они могут быть использованы в качестве топлива, если по технико-экономическим расчетам из них невозможно получить товарную продукцию (ДСП, ДВП и т. д.). И их сжигают в топках, большей частью не приспособленных для сжигания длинномерных отходов и сжигание это больше похоже на огневое обезвреживание, чем на получение тепла.

Что касается использования отходов лесозаготовок, то тут требуется хорошо просчитать экономическую эффективность. Вот результаты наблюдения. При подготовке площадки под строительство в одном из районов г. Минска были спилены деревья. Стволы разделали на поленья, а ветки порубили на щепу. За рабочий день было нарублено щепы объемом 5 м^3 . При объемной плотности щепы около 300 кг/м^3 масса ее составляет 1,5 тонны с влажностью 60 %. Теплота сгорания древесины при влажности 40 % составляет порядка 10,2 МДж/кг. При влажности 60 % теплота сгорания снижается до 5,8 МДж/кг. Значит, в полутора тоннах щепы содержится $5,8 \cdot 1500 = 8700$ МДж. Столько же тепла выделится (даже без учета разных КПД) при сжигании 230 кг мазута, который будет стоить (при цене 600000 руб. за тонну) 138000 руб.

А сколько стоит эта щепка в котельной (при нулевой стоимости отходов древесины на месте лесозаготовки)? Рубильная машина потребляет 8 л бензина в час. При семичасовом рабочем дне и цене бензина 2700 руб. за литр будет затрачено $7 \cdot 8 \cdot 2700 = 151000$ руб. Добавьте сюда стоимость топлива, потраченного трактором, в прицеп которого щепка грузилась, заработную плату четырем рабочим, стоимость перевозки рабочих, стоимость транспортировки щепы и рубильной машины, амортизационные отчисления. Во что обойдется теплота, полученная при сжигании такого топлива?

Конечно, нужно быть готовым к сжиганию отходов лесозаготовок, но следует понимать, что это вопрос не столько экономический, сколько политический, поскольку создает некоторую иллюзию энергетической безопасности государства. А вот если вдруг цены на нефть и газ поставщик нам увеличит, то, возможно, сжигание таких отходов станет и экономически целесообразным.

**Снижение эрозионного износа цилиндра
среднего давления паровых турбин,
работающих на закритических параметрах**

КАЩЕЕВ В.П., ХАИМОВ В.А., ВОРОНОВ Е.О., КАЩЕЕВА О.З., СОРОКИН В.Н.
Белорусский национальный технический университет
АООТ «Научно-производственное объединение по исследованию
и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова»
РУП «Минскэнерго», Минская ТЭЦ-4, Минская ТЭЦ-3
Национальная Академия Наук Беларуси
Объединённый институт энергетических и ядерных
исследований «Сосны»

Исследование относится к области энергетического машиностроения и может быть использовано при конструировании и модернизации паровых турбин закритического давления, работающих с промежуточным перегревом пара.

На внутренней поверхности нагрева труб котлов сверхкритического давления при окислении их металла образуется оксидная плёнка. При изменении температуры у металла труб и плёнки происходит различное расширение (из-за разных коэффициентов температурного расширения), что ослабляет сцепление плёнки с металлом и при соответствующих условиях, зависящих, прежде всего от толщины плёнки и температурного изменения, может привести к её отслоению.

Рассмотрены причины, приводящие к эрозионному износу проточной части цилиндра среднего давления турбин, работающих на закритических параметрах пара. Предложены объяснение эрозионного износа проточной части ЦНД, подтверждаемое на практике, и пути его уменьшения.

Данное техническое решение, выполненное на уровне изобретения (патент РБ № 4.203 «Цилиндр среднего давления паровой турбины»), позволяет повысить работоспособность и экономичность паровой турбины за счёт:

– уменьшения затрат на поддержание в работоспособном состоянии лопаточного аппарата и надбандажных уплотнений из-за снижения их абразивного износа;

– повышения КПД турбины;

– повышения срока службы вала турбины.

Изобретение внедрено на трёх энергоблоках (№ 4, 5 и 6 с турбинами Т-250/300-240) Минской ТЭЦ-4 и успешно работает. Экономия топлива при его использовании составляет на одном энергоблоке около 2000 тонн условного топлива в год. При цене топлива 100 долларов за 1 т у.т. это составит 200000 долларов в год. Также уменьшились затраты на ремонты.

Экономия от уменьшения стоимости ремонтов проточной части ЦСД-1, повреждаемой абразивным износом, можно оценить следующим образом. До внедрения изобретения ремонт проводился 1 раз в 4-е года. После внедрения изобретения он стал не нужен. Стоимость ремонта составляет 35000–45000 долларов. Следовательно, снижение затрат составит ещё 10000 долларов.

Итого, суммарный экономический эффект составит порядка 210000 долларов в год на одном энергоблоке.

УДК 621.311

Пути совершенствования ядерной энергетики

КАЩЕЕВ В.П., СОРОКИН В.В., СОРОКИН В.Н.
Белорусский национальный технический университет
Национальная Академия наук Беларуси
Объединённый институт энергетических и ядерных исследований «Сосны»

В настоящее время нет структуры ядерной энергетики, адекватной требованиям её устойчивого развития:

- неограниченных запасов сырья для производства делящихся изотопов на многие сотни лет;
- безусловного выполнения требования нераспространения ядерного оружия;
- равенства добытой из Земли и искусственно произведённой радиоактивности и захороненной в Земле после выжигания делящихся и использования по назначению радиоактивных изотопов;
- естественной безопасности ядерных реакторов.

Эволюционное развитие современной ядерной энергетики не может решить эти проблемы за счёт совершенствования применяемого оборудования и топлива. Традиционная ядерная энергетика была создана для использования топлива на основе урана-235, причём топлива с небольшим обогащением по урану-235, т. е. с большим по урану-238. Однако сегодня в рамках уран-плутониевого топливного цикла разработано множество вариантов ядерных реакторов, обладающих повышенной безопасностью и экономичностью, в частности, при использовании микротвэлов в качестве тепловыделяющих элементов. Разрабатываются установки, использующие вместе с ураном-235 торий-232 для повышения безопасности и в качестве сырья для наработки урана-233.

Управление отводом тепловой энергии из активных зон требует инновационных подходов. Одним из таких подходов является использование в качестве тепловыделяющих элементов шаровых микротвэлов с диаметрами в пределах 1,5–2,0 мм.

Конструктивная схема такого микротвэла включает топливный сердечник из делящихся материалов и многослойную защитную оболочку. Наружное покрытие выполняют из нитридов титана, ниобия, алюминия и других материалов, обеспечивающих удержание образующихся осколков деления и высокую коррозионную стойкость микротвэла.

Такие покрытия сохраняют высокую способность удерживать продукты деления до температур свыше 1600 °С, что обеспечивает отвод тепла при любых отказах системы охлаждения реактора.

На реакторах Белорусской АЭС желательно использовать тепловыделяющие кассеты с засыпкой шаровых микротвэлов.

УДК 621.311

Электроядерный способ производства урана-233

КАЩЕЕВ В.П., СОРОКИН В.В., СОРОКИН В.Н.
Белорусский национальный технический университет
Национальная Академия наук Беларуси
Объединённый институт энергетических и ядерных исследований «Сосны»

Основная проблема современной ядерной энергетики, основанной на делении ядер урана-235, – это проблема обеспечения её топливной базы.

Принципиально лучшим ядерным топливом для тепловых реакторов является уран-233. Но урана-233 в природе нет. Уран-233 образуется из тория-232 при захвате нейтрона ядром его атома. Запасы тория на Земле только в рудах редкоземельных элементов в три раза превышают запасы природного урана, причём, в уран-233 можно перевести практически весь торий. Для этого необходим источник нейтронов. Источником необходимых нейтронов может быть уран-235. При этом способе процесс наработки урана-233 осуществляется в активных зонах ядерных реакторов. Но, все типы ядерных реакторов, созданных до настоящего времени, обладают общим и неустранимым недостатком, обусловленным необходимостью обеспечения в активной зоне ядерного реактора сверхкритической массы делящихся изотопов. В результате этого существует принципиальная возможность перехода на деление на мгновенных нейтронах с выделением большой энергии за очень короткое время. При этом происходит разрушение реактора и выход радиоактивности в окружающую среду. Какие бы затраты материальных средств и усилий специалистов на создание усовершенствованных реакторов ни осуществлялись, они не позволят кардинально решить проблемы ядерной энергетики в настоящем и будущем времени, особенно в связи с появлением мирового терроризма. Именно поэтому длинный перечень преимуществ инновационных ядерных реакто-

ров, разработанных и разрабатываемых в мире, специалисты США заканчивают так: «В случае появления на АЭС террористов нас ожидает либо Три Майл Айленд, либо Чернобыль».

Альтернативным способом получения атомной энергии является использование подкритических ядерно-энергетических систем, управляемых электроядерным методом. Электроядерный метод представляет независимую возможность использования электроэнергии для крупномасштабного производства нейтронов, которые далее могут быть использованы дляработки ядерного топлива и трансмутации радиоактивных изотопов. Английская аббревиатура классических ядерно-энергетических установок, управляемых ускорителем – ADS. Широкомасштабная ядерная энергетика может быть осуществлена только при реализации её развития, основанного на электроядерном способе получения энергии. Производящий энергию электроядерный комплекс, основанный на классическом электроядерном методе – ADS, включает в себя ускоритель протонов, ограниченную небольшими размерами нейтронопроизводящую мишень и подкритическую активную зону ядерного реактора. Подкритичность активной зоны находится в диапазоне 0,94–0,98. В Евросоюзе и Японии работы по развитию системы ADS идут непрерывно в течение двух десятков лет.

УДК 681.51.01(075.8)

Приоритетные управления оптимизации технологических процессов тепловых электростанций

Кулаков Г.Т., Горельшева М.Л.

Белорусский национальный технический университет

В настоящее время одним из основных факторов, определяющих энергетическую безопасность Республики Беларусь, является износ основного оборудования ТЭС, что приводит к снижению экономичности, надежности и долговечности работы теплоэнергетического оборудования. При этом возрастают требования к качеству работы систем регулирования технологических процессов котлов и энергоблоков, работающих в широком диапазоне изменения нагрузок и режимов.

Планируемое внедрение двух энергоблоков АЭС в Республики Беларусь, которые будут работать в базовом режиме, приведет к тому, что пиковые и полупиковые изменения нагрузок в энергосистеме будут покрываться энергоблоками конденсационных электростанций за счет их работы в широком диапазоне изменения нагрузок. Это обстоятельство повышает актуальность проблемы существенного повышения качества регулирования технологическими параметрами ТЭС, работающих в условиях переменных режимов и нагрузок.

Распространение в области автоматизации на ТЭС получили двухконтурные САР (каскадные и САР с дифференцированием промежуточной регулируемой величины), для улучшения качества регулирования в широком диапазоне изменения нагрузок, дополненные устройством коррекции параметров динамической настройки (УКПДН).

Наибольшее распространение получили следующие методы оптимизации технологических процессов на ТЭС: подстройка параметров динамической настройки САР в зависимости от нагрузки; построение адаптивных САР; построение беспоисковых САР; синтез нечетких регуляторов; применение нейронных сетей; синтез и оптимизация многосвязных САР; синтез инвариантных систем; аналитическое конструирование регуляторов, включая синтез тепловых регуляторов и оптимизацию параметров их динамической настройки на основе метода полной компенсации в общем виде; синтез САР на основе модифицированного упредителя Смита и компенсации крайнего внешнего возмущения.

Проведенные исследования показали:

1. Типовые САР котлов и энергоблоков ТЭС, работающих в широком диапазоне изменения нагрузок и режимов, не могут обеспечить качественного регулирования основных технологических параметров, что приводит к снижению экономичности, надежности и долговечности работы энергетического оборудования.

2. Для существенного улучшения качества регулирования технологических процессов ТЭС необходимо ориентироваться на модернизацию типовых САР на базе многоконтурных инвариантных систем.

3. В основу структурно-параметрической оптимизации САР ТП ТЭС целесообразно положить методы аналитического конструирования регуляторов с использованием упредителя Смита и компенсацией выделенного эквивалентного крайнего внешнего возмущения, а также автоматизацией действий опытного человека-оператора котла или энергоблока при плановом изменении нагрузки.

4. В условиях дефицита инвестиций на модернизацию основных фондов энергосистемы актуальной становится задача разработки методики оценки экономической эффективности от внедрения новых способов и устройств существенного улучшения качества регулирования ТП ТЭС, работающих в широком диапазоне изменения нагрузок и режимов.

СЕКЦИЯ 5. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника

УДК 658.26

Использование нагрузки мелких отопительных котельных для комбинированной выработки электроэнергии

РОМАНЮК В.Н., Турлович Е.И., Бичан Т.Н.

Белорусский национальный технический университет

Повышение эффективности использования первичных энергоресурсов стало одним из приоритетных направлений экономической политики правительства Республики Беларусь. Здесь важную роль играет рационализация схем теплоснабжения населенных пунктов и отдельных предприятий, в том числе расширение теплофикации за счет вовлечения мелких потребителей электроэнергии.

Модернизация энергообеспечения путем интеграции в состав котельных когенерационных установок не нова. Первоочередным обстоятельством перевода котельных в теплоэлектроцентрали является определение базовой мощности с учетом реальных нагрузок систем теплоснабжения и особенностей существующих теплогенерирующих источников.

Целевой функцией при выборе мощностей комбинированного источника необходимо принимать снижение потребления первичных энергоресурсов при ограничениях экономического характера: срок возврата инвестиций и т. п. При близких значениях указанных показателей решение принимается на основе термодинамических характеристик, как наиболее объективных, и иных факторов, определяемых заказчиком. Ориентация на загрузку вводимых на отопительных котельных когенерационных модулей лишь на горячее водоснабжение в течение 8 тыс. часов в году ошибочна и снижает основной энергосберегающий эффект и замедляет решение стратегической задачи снижения энергоемкости ВВП в Республике Беларусь в 2 раза. Необходимо увеличение коэффициента теплофикации при выборе мощности когенерационных комплексов, вытесняющих нагрузку котельной мелких систем теплоснабжения. В этом случае когенерация обеспечивает снижение потребности страны в импорте природного газа до 1,6 тыс. т у.т. и сокращения выбросов вредных веществ до 3 тыс. т на 1 МВт электрической мощности генерирующих установок при сохранении уровня промышленного производства.

Изучение физико-химических свойств катализаторов Со/Га в синтезе жидких углеводородов из монооксида углерода и водорода с применением метода ТПД аммиака

Седнин В.А., Краецкая О.Ф., Прокопеня И.Н.

Белорусский национальный технический университет

Проблема получения моторных топлив и других химических продуктов из угля, природного газа или биомассы становится все более актуальной в связи с многочисленными прогнозами и скором исчерпании разведанных нефтяных запасов на фоне все возрастающего потребления нефти.

Одним из процессов получения жидких углеводородов из альтернативного сырья является синтез углеводородов из СО и Н₂ (синтез Фишера–Тропша).

Важной задачей этого процесса является разработка новых катализаторов, обладающих высокой активностью, селективностью, стабильностью и механической прочностью. Перспективными катализаторами Фишера–Тропша являются Со-системы, в присутствии которых образуются в основном жидкие и твердые алканы нормального строения.

Природа носителя оказывает значительное влияние на активность и селективность Со-контактов. В последнее время возрос интерес к носителям-цементам (галюминам). Для создания научных основ цементсодержащих катализаторов необходимо установить связь между физико-химическими свойствами и химическими характеристиками катализаторов.

Катализаторы Со/галюмин являются полифункциональными. Они содержат металлический кобальт и оксидные соединения кобальта, нанесенные на цементный носитель. В состав галюмина входит Al₂O₃, обладающий льюисовской кислотностью. Для выявления связи кислотных свойств катализатора с составом образующихся на нем продуктов синтеза нами был применен метод ТПД аммиака.

Спектры ТПД аммиака всех образцов 20%Со/Га, промотированных Pd, Ru и ZrO₂ содержат интенсивные пики десорбции в области 20–280 °С, температура максимумов которых лежит около 120 °С. В области 280–400 °С наблюдаются малоинтенсивные десорбционные пики. Выше этой температуры также наблюдается десорбция, которая относится не к аммиаку, а к воде, десорбирующейся из галюмина.

Таким образом, методом ТПД аммиака показано, что условия, при которых происходит восстановления катализаторов и состав оксидной составляющей активной Со-фазы, зависят от вида промотора.

Превращение смеси CO_2 и H_2 в горючие газы

СЕДНИН В.А., КРАЕЦКАЯ О.Ф.

Белорусский национальный технический университет

Некоторые гетерогенно-каталитические реакции CO_2 , например, его гидрирование до метана, имеют важное практическое значение. Этот процесс может быть использован для осуществления жизненного цикла в замкнутых пространствах. В этих случаях выдыхаемый людьми диоксид углерода улавливается поглотительной системой и подается в реактор вместе с водородом – получаемым (с кислородом) электролизом воды. Образующийся метан может быть использован как топливо.

Превращение CO_2 и H_2 в ценные химические продукты может способствовать решению актуальной в настоящее время проблемы утилизации CO_2 , который в больших количествах выбрасывается в атмосферу рядом крупнотоннажных химических, нефтехимических и коксохимических производств, образуется при сжигании угля, торфа, сланцев на ТЭЦ. Возрастание внимания к использованию CO_2 в качестве сырья для основного органического синтеза связано с истощением запасов нефти и природного газа.

Разработка процессов, обеспечивающих крупномасштабную его утилизацию, имеет значительную экологическую ценность. Кроме того, гидрирование CO_2 до метана может быть использовано для получения синтетического заменителя природного газа в странах, где запасы природного газа незначительны.

К перспективным направлениям относится также превращение смеси CO_2 и H_2 в монооксид углерода, который, в свою очередь, является ценным сырьем для органического синтеза.

Известно, что природа металла катализатора оказывает существенное влияние на превращение смеси CO_2 и H_2 . Установлено, что в присутствии Co - и Ni -образцов CO_2 селективно гидрируется до метана, на Cu - и Fe -образцах протекает восстановление диоксида углерода до CO с селективностью 100 %. Нами изучено влияние содержания активного компонента в присутствии Co , Ni -катализаторов.

Для этих систем основным продуктом реакции являлся CH_4 . С ростом содержания кобальта с 1 до 20 мас. % конверсия диоксида углерода и выход CH_4 возрастали. Оптимальные значения этих показателей были достигнуты при $[\text{Co}] = 10$ %. При этом селективность по основному продукту достигала 98 %.

Никелевые образцы также проявили высокую активность в гидрировании CO_2 до CH_4 .

Анализ нагрева многослойных тел

ЕСЬМАН Р.И., АЙДАРОВА З.Б.

Белорусский национальный технический университет

В специальных технологиях получения тонкостенных композиционных материалов значительный интерес представляют процессы нестационарного теплопереноса в многослойных стенках, имеющие нелинейный характер. При этом необходимо учитывать несимметричные условия теплообмена на поверхностях многослойной стенки отдельные слои могут претерпевать фазовые превращения: плавление, затвердевание, сублимацию, испарение и т. д. Такие задачи приходится решать при подплавлении теплозащитных покрытий космических аппаратов, в процессах лазерной и плазменной обработки литых изделий с использованием эффекта скоростного затвердевания, при получении тонкостенных литых конструкций на подвижных кристаллизаторах.

Экспериментальное оборудование для контактной диагностики теплофизических свойств материалов включает измерительный комплекс для сбора и обработки информации на базе цифрового термометра ТК-5, измерителя-регулятора (ИР) «Сосна-003», индикатора теплового потока ИТП-20М и приборов ИТ-λ-400, ИТ-с-400 для измерений коэффициента теплопроводности и теплоемкости.

Для оценки точности измерений необходимо установить возможные ошибки, возникающие при проведении измерений. По характеру ошибки подразделяются на систематические, случайные и промахи.

В случае измерения ИК-облученности калориметром ИМО-2, ошибки могут быть вызваны следующими причинами: дрейф нуля, вызванный тепловым движением частей оборудования; погрешность термостатирования приемника; колебания фона сравнения; неточность установки диафрагмы; непараллельность направлению измерения; погрешность калибровки; засветка посторонними источниками; погрешность считывания; инструментальная погрешность прибора.

Проведен анализ методик определения теплофизических характеристик материалов со специальными свойствами. Разработаны оптимальные методики, выбраны аппаратурные средства измерения температуры изучаемых образцов из многослойных материалов в камере лучистой обработки для индикации и контроля тепловых режимов сушки при обработке материалов концентрированными потоками энергии.

Анализ эффективности использования струйных трансформаторов в теплоснабжительной системе промышленного предприятия

КОСМАЧЕВА Э.М., ЛУКУТЬ А.С., САДОМЕНКО Е.И.
Белорусский национальный технический университет

Выпарные станции заводов являются мощными потребителями водяного пара, поэтому часто их теплоснабжение осуществляется от промышленных ТЭЦ, экономические показатели которых зависят от ряда факторов, в том числе, от параметров и величины производственного отбора.

Включение в схему выпарной установки струйного трансформатора теплоты, позволяющего повысить потенциал вторичного пара и использовать его в качестве греющего в том же аппарате, заставит отказаться от отбора пара $D_{гр}$ давлением $p_{гр}$ и получать от станции пар D_p давлением p_p , выполняющий функцию рабочего.

Изменение расхода топлива на парогенератор ТЭЦ в связи с применением в схеме выпарной станции парового инжектора определялось по формуле

$$\Delta B_{ПГ} = \frac{\xi_p D_p (i_p - i'_{гр})}{Q_n^p \eta_{ПГ}^{HT}} - \frac{\xi_{гр} D_{гр} (i_{гр} - i'_{гр})}{Q_n^p \eta_{ПГ}^{HT}},$$

где Q_n^p – низшая теплота сгорания топлива; $\eta_{ПГ}^{HT}$ – КПД (нетто) парогенератора в данном режиме; ξ – коэффициент ценности теплоты в точке тепловой схемы, где произошло изменение теплового потока, определялся по формуле, предложенной профессором Я.М. Рубинштейном $\xi = y[1 + k(1 - y)]$, здесь y – коэффициент недовыработки мощности паром отбора турбины; k – показатель, зависящий от начальных параметров установки, состава и особенностей тепловой схемы.

Исследовано изменение тепловой экономичности промышленной ТЭЦ, обеспечивающей выпарную станцию паром необходимых параметров. Анализируя результаты расчетов можно прийти к выводу, что установка струйного компрессора для повышения давления вторичного пара до уровня греющего, несмотря на относительно невысокий КПД этого устройства (8,9–13,3 %), дает определенную экономию топлива на источнике теплоснабжения (до 6 кг условного топлива на тонну инжектируемого вторичного пара).

Нагрев тел сложной геометрии

ЕСЬМАН Р.И.

Белорусский национальный технический университет

Современные многослойные изделия составляют широкую гамму материалов, которые используют в своем составе волокнистые, полимерные материалы, включающие неорганические и органические наполнители, углеродные волокна и углекомпози́ты (углепластики), силиконовые и фторкаучуковые композиты, метало- и стеклокерамические теплоизоляционные материалы, ткани на кремниевой основе и др. Особое место в ряду многослойных строительных материалов занимают сухие смеси и новые технологии получения гипсокартонных и гипсоволокнистых изделий со специальными свойствами.

Технологии получения многослойных материалов включают процессы нагревания, термообработки и сушки изделий. При разработке математических моделей термообработки изделий необходимо учитывать теплофизические особенности процесса нестационарного теплообмена в многослойной стенке.

Отдельные слои могут претерпевать фазовые или химические превращения (отвердевания термореактивных смол, гипсовых наполнителей, испарения или конденсации в пористых теплозащитных материалах). Расчет проводим с учетом фазовых превращений и зависимостей теплофизических характеристик сопряженных тел от температуры.

Постановка задачи состоит в следующем. Рассмотрим сопряжение тонкой стенки с массивным элементом заготовки сложной конфигурации. Задачу решаем в двумерной постановке, учитывая переменность теплофизических характеристик материала и нелинейные краевые условия.

В работе приведено численное решение задачи сложного теплообмена при получении пазогребневых плит в виде прямоугольного параллелепипеда в металлической форме. Ввиду двойной осевой симметрии можно ограничиться изучением тепловых процессов в плите и форме, расположенных в первой координатной четверти.

Определяем распределение температуры в системе сопряженных тел для каждого момента времени. В этих условиях температурное поле многослойной стенки описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений переноса теплоты (ввиду нелинейности потоков теплоты и граничных условий) с соответствующими краевыми условиями.

Оценка срока окупаемости затрат на сооружение модульного (модули М-I и М-II) унифицированного рекуператора для высокотемпературных теплотехнологий заготовительных и механосборочных производств машиностроительных заводов

НЕСЕНЧУК А.П., РЫЖОВА Т.В., ШИДЛОВСКИЙ В.В.,
ШКЛОВЧИК Д.И., КАЧАР И.Л.
Белорусский национальный технический университет
ОАО «Минский автомобильный завод»

Оценка выполнялась для рекуператора М-II к печи с расходом газооб-разного топлива $B = 150 \text{ м}^3/\text{час}$ и условий: $B = 150 \text{ м}^3/\text{ч}$; $t''_{\text{во}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$; $t''_{\text{др}} = 900 \text{ }^\circ\text{C}$ и $F = 7 \text{ м}^2$.

При этом число модулей М-II, образующих поверхность теплообмена составит $n_{\text{М-II}} = 8$ и $F = 8 \text{ м}^2$.

Общая масса рекуператора из чугуна «силал» будет

$$m_{17,5} = 4 \cdot 134 = 536 \text{ кг};$$

$$M_{\text{М-II}} = 8 \cdot 536 = 4290 \text{ кг}.$$

Затраты на сооружение рекуператора в сборе при стоимости литейного чугуна «силал» при $\text{ц} = 150 \text{ у.е./т}$ (по данным ОАО «МАЗ» на 03.2010) $\text{Ц}_{\text{сб}} = 800 \text{ у.е./т}$;

$$K = \text{Ц}_{\text{сб}} M_{\text{М-II}} = 3440 \text{ у.е.}$$

Экономический эффект от внедрения регенеративного теплоиспользования составит 17 % или $\text{Э} = 150 \cdot 0,17 = 25,5 \text{ м}^3/\text{час}$.

При годовом фонде рабочего времени в 6000 часов, запишем

$$\text{Э}_{\text{т}} = \text{Э} \cdot 6000 = 153000 = 153000 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Или в деньгах $\text{Э}_{\text{у.е.}}^{6000} = 32232 \text{ у.е./год}$ ($\text{ц}_{\text{т}} = 632000 \text{ руб./1000 м}^3$ по дан-ным ОАО «МАЗ» на 03.2010).

Срок окупаемости при $\alpha = 0,5$ составит

$$K = \frac{3440}{32232} 0,5 = 0,213 \text{ года}.$$

Или оценочный срок окупаемости будет

$$K_{\text{оц}} = 2,6 \text{ месяца}.$$

С учетом дополнительных затрат срок окупаемости составит три месяца.

К вопросу качественного сжигания лигнина в динамических потоках

Ярмольчик Ю.П.

Белорусский национальный технический университет

Вопросы энергетической безопасности для Республики Беларусь, вследствие низкой обеспеченности собственными энергоносителями, являются важнейшими компонентами национальной энергетической стратегии. Наиболее оптимальный способ решения этой проблемы – эффективное использование собственных альтернативных видов топлива. Одним из них является технический лигнин. Лигнин – вторая после целлюлозы основная часть древесины (от 19 до 28 %). Лигнин представляет собой сложную смесь, состоящую из лигнина растительной клетки, непрогидролизованной целлюлозы (полисахаридов), веществ лигногуминового комплекса с включением смол, не отмытых после гидролиза моносахаридов, минеральных и органических кислот, редуцирующих веществ, зольных элементов, а также влаги (до 70 %). Зольность кислого лигнина находится в пределах 6–25 % и зависит от условий и сроков его хранения в отвалах.

Цель исследования – определение основных организационных и технических мероприятий, позволяющих использовать лигнин для целей энергоресурсосбережения.

По физическим свойствам лигнин близок к торфу. Вследствие повышенного содержания углерода (59–67 %), незначительного содержания карбоксильных групп энергетическая ценность гидролизных лигнинов по выходу летучих горючих компонентов значительно выше, чем у древесины. Содержание летучих веществ в горючей массе лигнина составляет 65–68 %. Содержание горючих веществ в гидролизных лигнинах составляет 58–75 %. Выделяясь при нагреве лигнина, они способствуют ускорению воспламенения части топлива и его выгоранию. Таким образом, можно рассматривать диспергированный технический лигнин в качестве топлива, способного стабильно гореть и в динамическом потоке.

В настоящее время к внедрению рекомендованы технологические разработки, позволяющие получать и сжигать только брикетированную лигнопродукцию. Однако технический лигнин представлен частицами размером от нескольких сантиметров до 1 мкм и менее. Поэтому процессы брикетирования представляются более энергоемкими, чем подготовка лигнина к сжиганию в горелочных устройствах для дисперсных топлив. Кроме того, сжигание в динамических потоках значительно более эффективно, а пневмотранспорт в камеру сгорания требует меньших капитальных и эксплуатационных затрат, чем механические транспортеры.

**Методология конструирования горелочных устройств
для организации сжигания многофазных топлив
в турбулентных потоках**

ЯРМОЛЬЧИК М.А.

Белорусский национальный технический университет

Объемы поставок альтернативного дисперсного твердого топлива могут быть ограничены сезонностью и другими факторами. По этим причинам промышленность заинтересована в развитии технологий и разработке эффективных технических устройств для комбинированного сжигания различных видов альтернативного топлива, позволяющих придерживаться высоких требований к современным технологическим процессам – с одной стороны, и к возрастающим экологическим стандартам – с другой.

Цель исследования – выбор оптимальной принципиальной схемы и методики конструирования основных узлов и механизмов горелочных устройств в зависимости от физических, химических и геометрических характеристик проектного топлива и конфигурации камер сгорания.

В результате численных и натурных испытаний определено, что каналы подачи топлива целесообразно располагать внутри осевых и тангенциальных каналов подачи воздуха и вокруг стабилизатора (при использовании газообразного топлива) или в центре стабилизатора (при использовании жидкого и альтернативного дисперсного твердого топлива). Такая схема обеспечивает: образование рециклических завихрений у корня факела пламени, которые обеспечивают его стабильность даже в холодной топке; управление формой факела пламени; насыщение факела пламени топливом (за счет аэродинамического захвата); создание в центральной части факела пламени условий, способствующих значительному сокращению образования окисей азота. Для подачи первичного воздуха наиболее эффективным представляется использование двух независимых каналов с регулировкой сечения выходного отверстия.

Для случая турбулентных диффузионных факелов пламени процесс сгорания комбинированного многофазного топлива определяется структурой потока и условиями смешения различных видов топлива и распределенных потоков окислителя. Соотношение подводимого на горение воздуха по осевому и тангенциальному каналам определяет форму факела пламени, его размеры и интенсивность процессов, что позволяет эффективно оптимизировать технологические параметры.

Организация двух независимых потоков воздуха (осевого и тангенциального) представляется наиболее оптимальной при комбинированном сжигании различных видов органического топлива.

Стабилизация работы использования газотурбинных надстроек паротурбинных ТЭС и промышленных теплотехнологий

РОМАНОК В.Н., МУСЛИНА Д.Б., БОБИЧ А.А.

Белорусский национальный технический университет

Успехи в создании новых материалов, механообработке и разработке конструктивных решений в последние десятилетия обеспечили повышение надежности и эффективности газотурбинных установок (ГТУ), что в совокупности с достижениями в области систем автоматического управления создало условия для их использования в качестве высокотемпературных надстроек в энергетике и в теплотехнологиях. Эффективность использования первичных энергоресурсов в соответствующих системах возрастет, обеспечивая требуемое снижение УРТ, необходимое для уменьшения энергоемкости ВВП. В случае применения ГТУ имеет место негативное влияние температуры окружающей среды на их мощность и КПД, которые могут снижаться соответственно на 20 % и 5 %. Число часов стояния температур, при которых имеет место указанное изменение показателей, в Беларуси составляет в году до 2 тыс. ч и перерасход топлива оказывается существенным. С ростом цены энергоресурсов стало экономически целесообразным блокирование указанных изменений путем интеграции в состав инженерного обеспечения ГТУ абсорбционных чиллеров, обеспечивающих возможность стабилизации температуры воздуха, всасываемого ДВС. Абсорбционные бромисто-литиевые чиллеры за последние 60 лет доведены до совершенства конструкции. Использование ими для работы низкопотенциальной тепловой энергии в современных условиях обеспечивает этим холодильным машинам широкое применение. Эффективно их использование и для указанной выше цели, где обеспечивается возврат инвестиций, требуемых на указанную модернизацию, за период до 2 лет. Разработанные обоснования инвестирования для ОАО «Безастройматериалы», Бобруйской ТЭЦ-2 и Новополоцкой ТЭЦ показали, что при реализации этих проектов достигается суммарная годовая экономия топлива более 10 тыс. т у.т.

Тенденции развития энергетических хозяйств по производству биомассы

Лосюк Ю.А.

Белорусский национальный технический университет

Рост продуктивности земледелия и высвобождающиеся земли сельскохозяйственного назначения позволяют развивать новые тенденции в лесоводстве и земледелии. К числу таких следует отнести организацию энергетических плантаций. Их продукцию можно использовать как возобновляемый ресурс для производства различных видов топлива – твердых, жидких и газообразных.

К примеру, мировой лидер в производстве биотоплива – этанола для автомобильного транспорта – Бразилия выращивает сахарный тростник на площади 5,5 млн. га и может расширить эти плантации до 8,1 млн. га. В этой же стране действует ТЭЦ мощностью 30 МВт. Для нее культивируется плантация эвкалипта, занимающая 3000 га.

Швеция выращивает иву для сжигания в топках котлов на 14000 га заболоченных земель. Ива убирается комбайнами в зимнее время, когда лота замерзают.

Посадки быстрорастущего тополя в умеренном климате при регулярном поливе и подкормке удобрениями способны дать 15–22 т/га сухой органической массы, что превышает в 4–5 раз продуктивность обычных лесов.

Некоторые страны имеют большие площади для выращивания энергетических культур. Так, Индонезия может отвести до 27 млн. га выращивания масленичной пальмы. Полученное масло извлекается и перерабатывается в биодизельное топливо.

Масло для моторного топлива получают также из растения *jatropha*, культивируемого в Гане, Мали, Мозамбике, Индонезии и др. странах на малопригодных для сельского хозяйства землях. Причем плоды этого дерева несъедобны и не конкурируют с продуктами питания.

В зоне умеренного климата культивируется масленичная культура рапс. С одного гектара посевов получают до 1 т моторного топлива. Германия занимает под рапс более 1 млн. га земель и производит из него биодизельное топливо для сельскохозяйственных машин.

Республика Беларусь начала выращивать рапс в Гродненской, Витебской и Гомельской областях с последующей переработкой в топливо.

Имеется также возможность выращивать высокоурожайную иву на вновь заболачиваемых землях.

**Пути утилизации теплоты уходящего сушильного агента
в барабанных сушилках при сушке сахара**

Кочетков А.В., Мигуцкий Е.Г.

Белорусский национальный технический университет

В процессе сушки сахара используется в качестве сушильного агента (воздух), подогретый в паровом калорифере до 70 °С. После барабанной сушилки сушильный агент с температурой 50–53 °С направляется в мокрый скруббер для улавливания сахарной пыли. Орошение скруббера осуществляется диффузионным соком с температурой 60 °С и начальным бриксом 15 %. В дальнейшем после мокрой очистки отработанный воздух выбрасывается в атмосферу, а диффузионный сок с увеличенным до 20 % бриксом возвращается в технологический процесс. Нами предлагается утилизация теплоты сушильного агента методом рециркуляции т. е. возврата части сушильного агента в сушилку. При этом абсолютная влажность воздуха идущего на процесс сушки увеличится с 4,2 до 12 г/кг с. в. Относительная влажность сахара в конце процесса остается на прежнем уровне 0,02 %. Общий расход сушильного агента с увеличенным начальным влагосодержанием увеличивается. Однако количество воздуха после калорифера с начальными параметрами уменьшится. Таким образом уменьшится расход пара в калорифере. По нашим расчетам это мероприятие позволит снизить потребление теплоты на 308,7 Гкал/год или 44,6 т у.т./год. Это количество снижения потребления условного топлива соответствует годовому производству сахара 220000 т/год.

О целесообразности применения бинарных циклов в системах теплоснабжения

Седнин В.А., Левшеня А.И., Шкловчик Д.И.
Белорусский национальный технический университет

Одной из основных проблем в теплоэнергетике является повышение коэффициента использования теплоты топлива на энергетических установках. Эффективность использования топлива в первую очередь следует оценивать электрическим коэффициентом полезной действия (КПД). Одним из решений данной проблемы является использование бинарных циклов.

В настоящее время в республике достаточно широкое применение в промышленной и коммунальной энергетике нашли миниТЭЦ на базе газопоршневых двигателей. Электрический КПД которых в зависимости от мощности колеблется в пределах 34–46 %, при общем тепловом КПД 82–88 %. В мировой практике в настоящее время все шире стали использоваться электростанции, в которых в качестве рабочего тела используется низкокипящее рабочее тело (органические жидкости). Данная технология получила название – органический цикл Ренкина (ОЦР). Электрический КПД подобного рода установок составляет 16–20 %. Объединение газопоршневых установок и установок на ОРЦ позволяет получить электрический КПД комбинированной установки в пределах 42–56 % при общем тепловом КПД 82–88 %. Аналогичным образом можно рассматривать комбинацию газотурбинной установки с установкой на ОРЦ, в этом случае можно достигнуть электрического КПД для установок малой и средней мощности 40–52 % при общем тепловом КПД 82–85 %.

Использование циклов с органическими веществами является проверенной на практике и очень надежной технологией. Циклы с органическими рабочими телами продемонстрировали преимущества перед обычными паровыми циклами и особенно применимы к геотермическим электростанциям, и электростанциям использующие в качестве топлива биомассу (древесина, опилки, отходы), а также для утилизации высокотемпературных вторичных энергоресурсов, обеспечивающие отличные стоимостные и экологические преимущества.

**О методе оперативной оценки тепловых потерь
в системах теплоснабжения**

Седнин В.А., Петровская Т.А., Ганкевич Д.Ф., Шкловчик Д.И.
Белорусский национальный технический университет

Из отдельных задач, относящихся к группе диагностики и учета, можно выделить задачу определения транспортных тепловых потерь в теплопроводах СЦТ. В настоящее время отсутствуют эффективные методы оперативной оценки состояния теплопроводов в действующих тепловых сетях. Из существующих методов определения тепловых потерь вызывает определенный интерес для использования в составе АСУ ТП метод «тепловой волны».

В развитие методологии «тепловой волны» введены в рассмотрение две функции зависимости температуры от времени $f = f(\tau)$ и $q = q(\tau)$ – соответственно на входе и выходе из контрольного участка. Применяя интерполяцию синусами $\varphi(\tau) \approx \sum_{k=1}^{n-1} b_k \sin k \frac{\pi}{l} \tau$ и интегрируя приближенные формулы можно получить выражения для вычисления площадей под кривыми сигналов входа ($f = f(\tau)$) и выхода ($q = q(\tau)$) для промежутка времени $[0, \tau^*]$.

Для вычисления площадей под кривыми сигналов на всем интервале $[0, l]$ положим $\tau^* = l$. Тогда соответственно имеем:

$$F(l) = \int_0^l \varphi(\tau) d\tau \approx \frac{l}{\pi} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{b_k}{k} [1 - \cos(k\pi)] = \frac{l}{\pi} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{b_k}{k} [1 - (-1)^k] = \frac{2l}{\pi} \sum_{m=1}^{n/2} \frac{b_{2m-1}}{2m-1};$$

$$G(l) = \int_0^l q(\tau) d\tau \approx \frac{l}{\pi} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{b_k^*}{k} [1 - \cos(k\pi)] = \frac{l}{\pi} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{b_k^*}{k} [1 - (-1)^k] = \frac{2l}{\pi} \sum_{m=1}^{n/2} \frac{b_{2m-1}^*}{2m-1}.$$

Приведенные зависимости позволяют обрабатывать сигналы тепловой волны любой формы и, таким образом, использовать для диагностики тепловой сети колебания температуры теплоносителя, возникающие при эксплуатации тепловой сети или специально задаваемые. При этом в состав программного обеспечения АСУ ТП района теплоснабжения вводится программный модуль, который периодически выполняет расчеты по измеренным данным. Анализ этих статистических данных позволяет также оценить состояние тепловой изоляции теплопроводов.

Оптимизация температурных графиков регулирования отпуска тепловой энергии

Седнин В.А., Седнин А.А., Масевич И.В., Ганкевич Д.Ф.
Белорусский национальный технический университет

В настоящее время регулирование отпуска тепловой энергии осуществляется по качественному или количественно-качественному температурному графику. Актуальным является переход на оптимальный температурный график.

Как известно, расход топлива $B_{тс}$ на транспорт тепловой энергии в тепловых сетях определяется двумя составляющими: затратами на «перекачку» теплоносителя (гидравлическая составляющая) и затратами на тепловые потери (тепловая составляющая). Следовательно, можно оптимизировать значение температуры сетевой воды, исходя из минимизации затрат на транспорт тепловой энергии от теплоисточника до потребителя.

Для городских систем теплоснабжения, в которых преобладает нагрузка ГВС и отопления, предлагается следующая методика определения оптимальной температуры $t_{пс}$ отпуска прямой сетевой воды:

1. Определяется «наихудший» по условиям теплоснабжения (требуемый гидравлический напор и расчетная температура прямой сетевой воды) теплопотребитель (как правило – наиболее удаленный от теплоисточника).

2. Выполняется теплогидравлический расчет. Производится расчет по-токораспределения теплоносителя в тепловой сети по заданным тепловым нагрузкам с одновременным расчетом тепловых потерь. При этом определяется необходимый гидравлический напор на выходе теплоисточника и расчетная температура отпуска прямой сетевой воды.

Полученное значение расчетной температуры является минимально допустимым, обеспечивающим выполнение условия по качеству поставляемой температуры.

3. Производится поиск оптимальной температуры прямой сетевой воды

по условию $\frac{dB_{тс}}{dt_{пс}} = 0$ и $\frac{d^2B_{тс}}{dt_{пс}^2} > 0$ в интервале температур с ограничением

по нижней границе, определенной в п. 2, и ограничением по верхней границе согласно проектного температурного графика. Для этого может быть использован любой численный метод однопараметрической оптимизации, например, метод золотого сечения.

Основные направления развития электроэнергетической отрасли Республики Беларусь

Молочко Ф.И.
РУП «БелТЭИ»

С учетом влияния мирового экономического кризиса в результате падения производства промышленной продукции прослеживается снижение потребления энергоносителей и, в частности, за 2009 год по сравнению с аналогичным периодом прошлого года валовое потребление энергоресурсов сократилось с 39,3 до 36,8 млн. т у.т., электроэнергии – с 36,9 до 34,6 млрд. кВт·ч, теплоты – с 67,5 до 65,3 млн. Гкал. Названные факторы требуют корректировки ранее выполненных прогнозов в объемах потребления энергоносителей на ближайшую перспективу, а также определения уровня развития и модернизации отраслей топливно-энергетического комплекса (ТЭК) республики.

С учетом тенденций прошлого периода и планируемых темпов роста ВВП осуществлен прогноз потребления энергоносителей до 2015 года в соответствии с которым потребление электроэнергии по среднему уровню составит 37,1 млрд. кВт·ч, теплоты – 66 млн. Гкал, суммарных энергоносителей – 39,8 млн. т у.т. Для обеспечения названных показателей на данной стадии прогноза развития отраслей ТЭК основное влияние уделено электроэнергетической отрасли, т. к. с учетом планируемого сооружения АЭС возникают особые условия регулирования нагрузки энергосистемы.

Основные направления развития генерирующих источников ориентированы на замещение выбывающих морально и физически устаревших паросиловых мощностей на действующих КЭС на парогазовые технологии (ПГУ) и, в частности: установка ПГУ ориентировочной мощностью 400 МВт на Лукомльской и Березовской ГРЭС, завершение сооружения ПГУ-400 на Минской ТЭЦ-5, установка газотурбинных агрегатов (ГТУ) на Бобруйской ТЭЦ-2, Новополоцкой и Витебской ТЭЦ, сооружение новой Брестской ТЭЦ-2 (первая очередь ПГУ-65 МВт), ПГУ-65 в г. Борисове, ПГУ-25 на ТЭЦ-1 в г. Могилеве, сооружений ряда энергоисточников на местных видах топлива (Лунинец, Барань, Витебск, Речица, Мозырь), Гродненской ГЭС – 17 МВт, Полоцкой ГЭС – 23 МВт.

Параллельно с источниками энергосистема получает дальнейшее развитие собственных блок-станций у отдельных потребителей общей мощностью до 150 МВт.

В программе также предусматриваются мероприятия по развития электрических и тепловых сетей.

**Использование теплоты конденсации водяных паров
дымовых газов в системах теплоснабжения**

Молочко А.Ф.
РУП «БелТЭИ»

В дымовых газах любых топливоиспользующих установок содержится до 10 и более процентов водяных паров, теплосодержание которых безвозвратно выбрасывается в окружающую среду. Температура уходящих газов в котельных и на электростанциях составляет 110–160 °С, а в нагревательных печах различного назначения доходит 800 °С.

Если обеспечить снижение этой температуры ниже точки росы (50–55 °С), то можно дополнительно получить до 15 процентов теплоты, в том числе до 10 процентов за счет конденсации водяных паров и до 5 процентов за счет теплосодержания уходящих дымовых газов. Использование контактных экономайзеров для этих целей – метод общеизвестный. Однако широкое его применение в системах теплоснабжения не получило должного развития из-за относительно низкой температуры нагрева воды в таких экономайзерах и в основном по причине того, что вода становится «агрессивной», так как насыщается кислородом, а от контакта с CO₂ образуется угольная кислота.

Для устранения названных недостатков в РУП «БелТЭИ» разработаны и созданы два опытных образца контактно-поверхностных водонагревателей мощностью 1 и 3 МВт, которые прошли все стадии испытаний и подтвердили высокую эффективность с КПД по высшей теплоте сгорания топлива до 95 процентов, а по низшей – до 103 процентов.

Технические преимущества контактно-поверхностных водонагревателей состоят в том, что вода после нагрева в контактной насадке поступает на надтопочный диск, по опускающим трубам в водяную рубашку топочной камеры, где догревается до 95 °С. После нагрева вода по сливным трубам поступает в бак-накопитель соединений с топочной камерой работающей под разрежением. Благодаря такой схеме вода находится под разрежением в баке-накопителе, в сливных трубах и на надтопочном диске. При таких условиях осуществляется интенсивная деаэрация воды по всему тракту КПВН, а ее качество соответствует требованиям воды для тепловых сетей.

На описанную конструкцию получены два положительных решения на выдачу патентов.

Работа газовых турбин с регенерацией при частичных нагрузках

БЕГЛЯК А.В.

Белорусский национальный технический университет

В работе выполнен анализ повышения эффективности использования газообразного топлива, с помощью применения регенерации при снижении тепловой нагрузки для цикла газотурбинной установки с изобарным подводом теплоты ($p = \text{const}$).

В простом цикле газотурбинной установки (ГТУ) имеет место прямая зависимость выработки электрической энергии от тепловой нагрузки у потребителя. Поэтому при снижении тепловой нагрузки, что имеет место на промышленном предприятии в зависимости от сезонной (часовой, суточной, недельной, годовой) потребности в тепловой энергии, происходит снижение общей нагрузки на ГТУ. На рис. 1 приведена зависимость электрического КПД работы газовой турбины SGT-300 компании Siemens от тепловой нагрузки потребителя. Точки, отмеченные на рисунке, показывают нагрузку на установку.

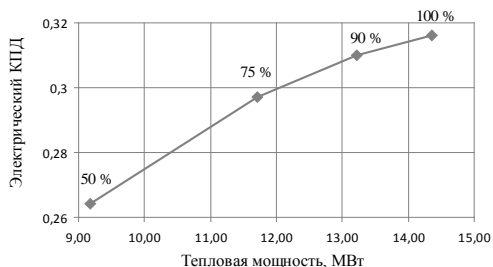


Рис. 1. Зависимость электрического КПД от тепловой мощности при $T_{\text{ос}} = +10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рассмотрим вопрос оптимизации при снижении тепловой нагрузки от 100 % до 65 %. Для повышения эффективности использования топлива при переменных нагрузках предлагается использовать различную степень регенерации (25 %, 50 %, 75 %, 100 %). На рис. 2 приведена полученная зависимость электрического КПД от тепловой мощности при использовании различной степени регенерации.

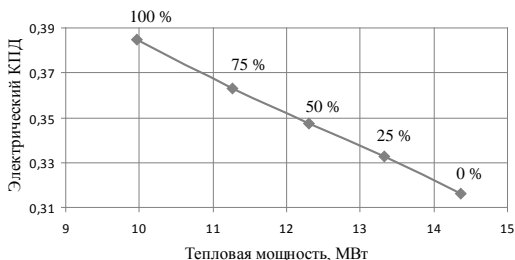


Рис. 2. Зависимость электрического КПД от тепловой мощности при увеличении степени регенерации, $T_{\text{ос}} = +10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Повышение эффективности использования газотурбинных установок в промышленности

РОМАНОК В.Н., МУСЛИНА Д.Б., БОБИЧ А.А.

Белорусский национальный технический университет

Успехи в создании новых материалов, механообработке и разработке конструктивных решений в последние десятилетия обеспечили надежность и эффективность двигателей внутреннего сгорания (ДВС), что в совокупности с достижениями в области систем автоматического управления создало условия для использования указанных тепловых двигателей в качестве высокотемпературных надстроек в низко- и среднетемпературных технологиях в энергетике и в теплотехнологических производствах преобразования вещества. Эффективность использования первичных энергоресурсов в соответствующих системах возрастает, обеспечивая снижение УРТ до 40 %. В случае применения газотурбинных установок (ГТУ) имеет место известное негативное влияние повышения температуры окружающей среды на их мощность и КПД, уменьшающее их значения на величину соответственно до 20 % и 5 %. Число часов стояния температур, при которых это имеет место, в Беларуси составляет 2 тыс. часов и перерасход топлива оказывается существенным. С ростом цены энергоресурсов стало экономически целесообразным блокирование указанных изменений путем интеграции в состав соответствующих систем абсорбционных чиллеров, обеспечивающих возможность стабилизации температуры воздуха, всасываемого ДВС. Абсорбционные бромисто-литиевые чиллеры за последние 60 лет доведены до совершенства конструкции, а использование ими для привода низкопотенциальной тепловой энергии в современных условиях находят широкое применение. Эффективно их использование и для указанной выше цели в составе инженерного обеспечения ДВС. Например, для ГТУ, которые сегодня используются при переводе паротурбинных ТЭС на парогазовую технологию, а также при энергообеспечении среднетемпературных теплотехнологий, обеспечивается возврат инвестиций, требуемых на указанную модернизацию, за период до 2 лет.

**Организация стабильного потока смеси воздуха
и дисперсного твердого топлива при сжигании
в установленных теплогенераторах**

Ярмольчик Ю.П.

Белорусский национальный технический университет

В условиях повышения цен на нефтепродукты и природный газ интерес к использованию твердого топлива как к основному альтернативному энергоносителю возрастает. В результате вопрос о развитии новых энергоэффективных технологий сжигания мелкодисперсных твердых топлив (измельченных углей, торфа, бытовых и промышленных горючих отходов, сланцев и т. п.) является актуальным.

Однако использование подобных видов топлива сопровождается необходимостью решения задачи организации стабильного и экологичного горения в топках уже существующих теплогенераторов.

Целью исследования является организация энергоэффективного и стабильного сжигания мелкодисперсного твердого топлива в установленных энергогенерирующих агрегатах. В работе дается анализ современного состояния белорусской энергетики и подчеркивается актуальность проблемы замещения проектных топлив. Обосновывается выбранная методика проведения исследований, рассмотрены основные тенденции, связанные с замещением проектных топлив. Представлен обзор проведенных исследований, связанных с проблемой перехода на непроектное топливо, как на основе экспериментального подхода, так и на основе применения пакетов прикладных программ. При замещении базового топлива требуется изменить конструкцию топки и условия эксплуатации оборудования, применить принципиально новое горелочное устройство, что приводит к значительным материальным затратам, привлечения большого числа специалистов, вывода теплогенерирующего агрегата из эксплуатации на длительный срок, но при этом гарантировать надежную и эффективную работу агрегата после реконструкции невозможно. Проведение вычислительных экспериментов позволяет значительно снизить затраты и повысить эффективность разработки по сравнению с экспериментальными исследованиями. Для построения адекватной математической модели аэродинамики дымовых газов, процессов горения и теплообмена в топках используется метод Эйлера-Лагранжа для описания движения газа и взвешенных частиц. Численными методами определены режимные параметры при изменении дисперсности и плотности топлива, скорости потока топливовоздушной смеси и вторичного воздуха, подаваемого на горение, а также конфигурация и геометрические характеристики оптимального пламени.

О роли футеровки печи в процессе теплообмена при нагревании садки

КОВАЛЕВ С.С.

Белорусский национальный технический университет

Выбор оптимальной схемы отопления печи должен прежде всего отвечать таким требованиям, как равномерное температурное поле в печи, экономичность эксплуатации, качественное и эффективное сжигание топлива и высокая надежность тепловой обработки металлической садки.

Нагрев изделий с заданной равномерностью по всему сечению является важным критерием в отношении ожидаемого качества горячего формообразования. Кроме того, в случае различных геометрических размеров нагреваемых заготовок, а также варьируемых марок сталей следует точно выдерживать температурные графики нагрева. Адаптируемые температурные зависимости позволяют избежать термического перегрева материала. Выдержать конкретный температурный график можно лишь при правильно организованном процессе теплообмена.

Теплообмен излучением является основным способом передачи теплоты в печах с температурой выше 800 °С. Чем выше температура печи, тем (при определенных условиях) большее значение имеет излучение. Поэтому, как правило, интенсификация теплообмена в нагревательных печах выполняется за счет лучистой составляющей теплообмена.

При теплообмене в печах особую роль играет футеровка рабочего пространства (кладка). Основное назначение футеровки состоит в доведении к минимуму неизбежных тепловых потерь во внешнее пространство через ограждающие конструкции. Кроме того, футеровка, получая теплоту от первичного излучателя – нагревателя (факела или газов), поглощает теплоту и передает ее обратно в печь. Поглощенная футеровкой теплота при наличии хорошей внешней теплоизоляции стен также возвращается в печь путем собственного излучения кладки и в конечном итоге передается нагреваемому металлу. В дополнение к этому, горячая поверхность футеровки, интенсивно омываемая потоком газов, получает от них теплоту конвекцией, которая после поглощения ее кирпичной кладкой переизлучается к поверхности металла. Таким образом, кирпичная кладка (футеровка) в этом случае является трансформатором теплоты, полученной конвекцией от газов, в теплоту излучения.

**Анализ энергетических и экологических факторов
при производстве и использовании биогаза
на очистных сооружениях**

ПРОКОПЕНЯ И.Н.

Белорусский национальный технический университет

Для проведения анализа в работе рассмотрена модель биогазового комплекса (БГК) работающего на коммунально-бытовых стоках городских очистных сооружений.

При выполнении расчетов пранализированы три варианта реализации БГК с различными типами энергетических установок для использования производимого биогаза: вариант 1 – промышленно-отопительная котельная на базе водогрейных котлов; вариант 2 – мини-ТЭЦ на базе газопоршневых агрегатов; вариант 3 – мини-ТЭЦ на базе газовых микротурбин. Для каждого из вариантов рассмотрены схемы с использованием регенерации теплоты сброженного субстрата и без нее.

Получаемыми при сжигании биогаза тепловой и электрической энергией (при ее наличии), обеспечиваются собственные нужды биогазового комплекса. Излишки тепловой энергии используются для покрытия тепловых нагрузок очистных сооружений, а излишки электроэнергии отпускаются в энергосистему.

Анализ годового энергетического баланса показал, что существуют схемные решения, при которых биогазовый комплекс является энергетически самодостаточным и может работать автономно, независимо от энергосистемы.

Следует отметить, что во всех вариантах реализации схем, наблюдается системная экономия топлива (природного газа), импортируемого в страну. В результате чего происходит уменьшение валовых выбросов диоксида углерода и оксидов азота в атмосферу.

Анализ показал, что с учетом сокращения выбросов парниковых газов от иловых площадок и локального увеличения выбросов оксидов азота на месте строительства при любом варианте реализации БГК, экологически эффективным в рамках условий Республики Беларусь является строительство БГК по варианту 3 с организацией регенерации теплоты сброженного субстрата.

Проведена технико-экономическая оценка вариантов строительства БГК, при этом затраты на ТЭР и поставляемое оборудование принимались на уровне мировых. Наиболее экономически эффективной является схема реализации БГК по варианту 2 с регенерацией теплоты сброженного субстрата, но при этом ухудшаются экологические показатели.

Тенденции развития энергетических хозяйств

МОГИЛАТ Г.А., КАЧАЛОВСКИЙ Е.В., НИКОЛАЕВ Е.Ю.
Белорусский национальный технический университет

Известно, что в Республике Беларусь энергоемкость ВВП, характеризующая макроэкономический объем потребляемых энергоресурсов в тоннах нефтяного эквивалента на тысячу долларов США по паритету покупательной способности составляет 0,43, в то время как у развитых европейских государств он равен 0,2 тыс. тонн условного топлива. Для уменьшения этого показателя и в связи с возрастанием цен на топливо одним из прорывных направлений развития белорусской энергетики может стать разработка и серийное производство экологически чистых ветроэнергетических установок.

На начальном этапе необходимым условием развития ветроэнергетики в Беларуси является сотрудничество с зарубежными компаниями и заимствование мировой практики.

В соответствии с картой фонового районирования скоростей ветра в Беларуси наиболее эффективно обеспечивается использование современной зарубежной ветротехники на территориях зон со среднегодовыми фоновыми скоростями не ниже 4,5 м/с на холмистом рельефе. К таким регионам относятся: возвышенные районы большей части севера и северо-запада Беларуси, центральная зона Минской области, включая прилегающие с запада районы, Витебская возвышенность. Местами на обследуемых территориях возможно обнаружение не выявленной ранее энергоэффективной холмистости, а также других энергоэффективных площадок для строительства не только мощных ВЭУ, но и ВЭС (например, в продуваемых долинах большой протяженности, вблизи крупных водных массивов, на высоких откосах и т. п.). Исходя из ветроэнергетического потенциала только в Минской области насчитывается 1076 строительных площадок под размещение на каждой от 3 до 10 ВЭУ континентального базирования мощностью до 1000 кВт. Среднегодовая выработка только 10 % этих ВЭУ в статистическом распределении времени работы в номинальном режиме от 2500 до 3300 часов в год на срок эксплуатации установок составляет около 2676 млн. кВт·ч. Соответственно среднегодовая экономия жидкого топлива составит более 800 тыс. тонн.

Теплоснабжение жилого комплекса с использованием подземного аккумулирования теплоносителя

Лосюк Ю.А.

Белорусский национальный технический университет

Для целей отопления зданий в различных странах, расположенных в зоне умеренного климата, расходуется до 30–40 % общего количества используемых энергетических ресурсов.

Заметная доля ископаемого органического топлива может быть сэкономлена, если в схемах отопительных систем использовать солнечные коллекторы, которых в мире более 100 млн. м². Имеются примеры встраивания солнечных коллекторов в системы отопления многоквартирных домов и районных тепловых систем. Так, в австрийском г. Граце крупная гелиосистема с суммарной площадью солнечных коллекторов 1407 м² размещается на крыше катка стадиона Шварценеггера. За год она генерирует 600 МВт·ч теплоты и одновременно предотвращает эмиссию 250 т CO₂.

В Мюнхене запущена в действие система гелиотеплоснабжения площадью 2760 м², обслуживающая 13 зданий с 320 квартирами. Объем теплового аккумулятора $V = 6000 \text{ м}^3$. Немецкий город Крайльсхайм имеет систему площадью 10000 м² для теплоснабжения микрорайона из 260 квартир на базе крышных солнечных коллекторов и коллекторов, размещенных на южной стороне шумозащитного ограждения.

В систему включены также два буферных бетонных тепловых аккумулятора объемом $V_1 = 100 \text{ м}^3$ и $V = 600 \text{ м}^3$. Они дополнены сезонным грунтовым аккумулятором $V = 11400 \text{ м}^3$.

Еще в 1979 г. подобная схема отопления применена в Швеции, в городе Студвик. Относительно небольшой тепловой грунтовой аккумулятор в 640 м³ содержит горячую воду с $T = 70 \text{ °C}$ в начале сезона. Более мощный аккумулятор размещается в г. Упсала (Швеция) с объемом воды 100000 м³ и температурой 95 °C.

Самый большой подземный тепловой аккумулятор в 800000 м³ создан в Канаде (г. Скарборо). Он размещается в водоносном слое, расположенном на глубине 800 м. Заполняется аккумулятор горячей водой из солнечных коллекторов через центральную скважину, а из 4 периферийных откачивается холодная вода. Республика Беларусь характеризуется достаточно большим приходом солнечной энергии особенно в весенне-летний период, сравнимым с солнечной радиацией в Германии. Поэтому целесообразно создавать солнечные подземные системы аккумулирования горячего теплоносителя.

**Работа парожидкостных компрессионных
теплонасосных установок в нерасчетных условиях**

КОСМАЧЕВА Э.М., ЛУКУТЬ А.С., САДОМЕНКО Е.И.
Белорусский национальный технический университет

Теплонасосная (ТН) система предназначена для использования теплоты, отводимой от окружающей среды или другого низкопотенциального источника, для технологического или бытового теплоснабжения. Изменение тепловой нагрузки любого элемента установки (испарителя или конденсатора) вызывает изменение работы всех элементов и установки в целом. При этом наблюдается переходный режим, который продолжается до наступления нового установившегося режима. Сократить длительность переходного режима и поддержать на заданном уровне наиболее важные параметры (например, температуру воды после конденсатора) позволяет искусственное регулирование. Изменение расхода рабочего агента обычно осуществляется путем воздействия на дроссельный вентиль перед испарителем. Снижение тепловой нагрузки конденсатора вследствие прикрытия дроссельного вентиля приводит к изменению теплового режима потребителей, снабжаемых теплом от этой установки. В работе осуществлен анализ поведения параметров системы ТН установки при изменении расхода рабочего агента путем прикрытия дроссельного вентиля.

Данное мероприятие вызывает снижение тепловой нагрузки конденсатора, а также температуры горячей воды τ_1 , поступающей из конденсатора в систему теплоснабжения, что, в свою очередь приводит к снижению температуры воды после отопительной системы τ_2 , т. е. температуры воды, поступающей в конденсатор теплового насоса. Однако изменение τ_2 происходит медленнее, чем τ_1 . При постоянном эквиваленте расхода низкопотенциального теплоносителя и сетевой воды в ТН установке, а также постоянной температуре этих сред на входе в испаритель и конденсатор, соответственно, прикрытия дроссельного вентиля приводит к следующей перестройке режима работы установки: снижается давление в испарителе и конденсаторе, а значит температура испарения и конденсации рабочего агента в соответствующих аппаратах; снижаются коэффициент подачи поршневого компрессора и его объемная подача; повышается температура низкопотенциального теплоносителя на выходе из испарителя и снижается температура сетевой воды на выходе из конденсатора; снижается тепловая нагрузка испарителя и конденсатора, а также коэффициент преобразования энергии (отопительный коэффициент).

Компьютерное моделирование и анализ процессов тепломассопереноса

ЕСЬМАН Р.И.

Белорусский национальный технический университет

В настоящее время численные методы и интерактивная графическая техника составляют единое целое в программах систем автоматизации научных исследований и автоматизированного проектирования. В качестве вычислительного средства часто используется метод конечных элементов (МКЭ). Суть МКЭ состоит в замене математической модели исследуемого процесса или объекта системой алгебраических уравнений. Большинство математических моделей содержит систему дифференциальных или интегральных уравнений относительно тех функций от координат и времени, которые являются важнейшими характеристиками исследуемого процесса. При применении МКЭ исследуемый объект условно разбивается на небольшие части (конечные элементы). Каждый элемент включает некоторое количество узловых точек. Целью метода является вычисление искомых функций в этих узлах. Таким образом, МКЭ заменяет анализ сложной модели более простой задачей решения алгебраической системы, которая может содержать достаточно большое число неизвестных. С появлением компьютеров интерес к дискретному представлению объектов существенно возрос. МКЭ в отличие от метода конечных разностей основан на вариационном исчислении. В методе конечных разностей используется разностная аппроксимация производных, входящих в дифференциальные уравнения. При использовании метода конечных элементов, представляющего собой неявное применение метода Рунге (Рунге – Рунге – Галёркина) на отдельных отрезках, физическая задача заменяется кусочно-гладкой моделью. Дифференциальное уравнение, описывающее задачу, и соответствующие граничные условия используются для постановки вариационной задачи, которая затем непосредственно решается.

Основными этапами применения метода являются следующие: дискретизация задачи, т. е. представление расчетной области в виде совокупности конечных элементов, взаимосвязанных в узловых точках; получение матриц элементов; построение общей матрицы для всей области и вектора нагрузки; наложение граничных условий; решение системы уравнений; расчет любой другой функции, зависящей от узловых неизвестных.

Разработка алгоритмов решений сопряженных задач нестационарной теплопроводности

ЕСЬМАН Р.И.

Белорусский национальный технический университет

Во многих технологиях получения современных композиционных материалов со специальными свойствами действуют внутренние источники теплоты. Они могут быть положительными (выделение теплоты фазового перехода при затвердевании, теплоты кристаллизации при формировании металлических литых изделий, теплоты испарения при увлажнении материалов и т. д.) или отрицательными (процессы сушки, испарения влаги во влажном материале в процессе нагревания и т. д.).

В работе приведены математическая модель и численное решение задачи нестационарной теплопроводности с переменными источниками теплоты, действующими на протяжении процесса затвердевания. При этом учитывается перемещение фронта фазовых превращений во времени и пространстве. Разработанные математическая модель и алгоритм расчета применяются в данном случае для анализа теплотехнологий получения современных строительных материалов на основе сухих смесей – изделий из гипса, пеногипса, пенобетона, пенополистирола и гипсовых плит со специальными свойствами.

Представленная в работе модель нестационарной теплопроводности с фазовыми превращениями применяется для расчета поля температур и температурных напряжений гипсовых плит пазогребневой конструкции и металлических форм.

В последнее время в производстве взаимозаменяемых стеновых материалов важное место занимают влагостойкие и огнестойкие гипсовые перегородочные плиты пазогребневой конструкции. Они представляют собой гипсовые вяжущие изделия, изготовленные по литейной технологии. Производство таких изделий осуществляется в цельнометаллических подвижных формах высокопроизводительных карусельных формовочных машин. После удаления из формовочной машины плиты сушат в туннельном сушиле с рециркуляционной системой.

**Энергосберегающий потенциал привлечения
децентрализованных когенерационных источников
к регулированию графика генерации энергосистемы**

РОМАНЮК В.Н., КОЛОМЫЦКАЯ Н.А., ГЛАТАНКОВ В.В.
Белорусский национальный технический университет
РУП «БелТЭИ»

Глобальная проблема выравнивания графиков электрической нагрузки энергосистемы актуальна и рассматривается многими специалистами. Годовой перерасход топлива, связанной с неравномерностью генерации электроэнергии, в РБ превышает сто тыс. т у.т. Проблема в будущем обострится и требует для решения принятия комплекса мер: создание оптимальной структуры энергогенерирующих мощностей, реализация экономических и административных шагов, ограничивающих и стимулирующих мер привлечение потребителей электроэнергии к выравниванию графиков нагрузки и пр. Среди перечня путей решения рассматриваемой задачи не следует пренебрегать потенциалом распределенных мелких электрогенерирующих источников промышленных предприятий.

Структура генерации электроэнергии в стране будет изменяться, все больший вес будет принадлежать децентрализованной выработке, снижая и без того невысокий коэффициент использования основных мощностей. Тому имеют место объективные экономические причины, побуждающие промышленных потребителей электроэнергии к строительству собственных когенерационных мощностей. Последнее имеет и другие объективные причины. Например, идеальное с энергетических позиций теплотехнологическое предприятие не должно потреблять электроэнергию от внешних источников не связанных с обеспечением теплового его потребления, т. е. электроэнергия для предприятия должна быть выработана ТЭЦ на тепловом потреблении субъекта хозяйствования. Очевидно, что для большинства предприятий это возможно лишь с привлечением к этой задаче собственных когенерационных мощностей. Электрогенерирующий потенциал таких источников – промышленное потребление и его привлечение обещает энергетическую выгоду, оцениваемую в сотни тыс. т у.т. в год. Экономические преимущества более весомы, что связано с их многогранностью.

Современные подходы к энергообеспечению теплотехнологических предприятий

РОМАНЮК А.В., ОВЧАРЕНКО Т.В.

Белорусский национальный технический университет
РУП «БелТЭИ»

Успехи в создании новых материалов, механообработке и разработке конструкционных решений в последние десятилетия обеспечили повышение надежности и эффективности двигателей внутреннего сгорания (ДВС), что в совокупности с достижениями в области систем автоматического управления создало условия для их использования в качестве высокотемпературных надстроек в теплотехнологиях. Заметное снижение финансовых затрат на энергообеспечение является мощным стимулом для широкого внедрения собственных когенерационных мощностей. Эффективность использования первичных энергоресурсов возрастает, обеспечивая требуемое снижение УРТ, необходимое для уменьшения энергоемкости ВВП страны. Вместе с тем, совершенствование энергоиспользования непосредственно самих теплотехнологий первично и должно осуществляться с учетом требований сопряжения последних с когенерационными источниками. Это и минимизация потребления тепловой энергии, и адаптация параметров теплоносителей к возможностям когенерационного энергообеспечения. Ярким примером является РУП «Новополоцкий завод БВК», где регенеративное использование технологических потоков, возможность которого установлена нами в ходе анализа теплоэнергетической системы предприятия, снижает потребление пара до 3 Гкал/час и соответственно нагрузку на систему оборотного водоснабжения. При этом модернизация основной технологии позволила сохранить нагрузку Новополоцкой ТЭЦ и более чем в два раза снизить потребление тепловой энергии на сушку продукта. В результате обозначенного совершенствования энергоиспользования в технологическом процессе изменились потребность в типоразмере когенерационного источника со всеми вытекающими последствиями, связанными с требуемыми инвестициями, сроками строительства, отношениями с энергосистемой при увеличении экономической целесообразности проекта и, главное, финансового положения предприятия.

СЕКЦИЯ 6. Экономика и организация энергетики

УДК 621.311

К формированию экономических отношений блок-станций и энергосистемы

ЛИМОНОВ А.И.

Белорусский национальный технический университет

Для решения комплекса организационных, экономических и технических проблем, обусловленных наличием значительного количества блок-станций, работающих параллельно с генерирующим оборудованием энергосистемы, разработано положение о требованиях к блок-станциям субъектов хозяйствования. В положении конкретизированы критерии отнесения блок-станций к объектам малой и нетрадиционной энергетики (постановление Совета Министров Республики Беларусь № 400 от 24.04.1997), на которые в соответствии с постановлением Министерства экономики Республики Беларусь № 91 от 31.05.2006 распространяются льготы по формированию тарифов на электроэнергию, продаваемую в энергосистему. Определён порядок выдачи технических условий на сооружение блок-станций, который включает основные технические требования к оборудованию блок-станций, к измерению и учёту электроэнергии, к аварийной и предупредительной сигнализации, к собственным нуждам электроэнергии, требования к качеству электроэнергии. Предусмотрены схемы подключения блок-станций и порядок их включения в сеть энергосистемы, который конкретизируется дополнительным положением о взаимоотношениях персонала блок-станций и оперативного персонала энергосистемы. Отдельно рассмотрены договорные отношения владельцев блок-станций с энергосистемой, в которых в качестве основных проблем выделены: 1) неконтролируемая в ряде случаев выдача невостребованной мощности в энергосистему в ночные часы суток; 2) необходимость поддержания энергосистемой горячего резерва мощности, компенсирующего возможное прекращение поставок электроэнергии от блок-станций; 3) недостаточность в настоящее время реальных рычагов воздействия со стороны энергосистемы на владельцев блок-станций; 4) несогласованность положений существующей нормативной базы, касающихся взаимных расчётов энергоснабжающей организации и владельцев блок-станций, осуществляющих как поставку, так и потребление электроэнергии; 5) отсутствия дифференциации тарифов на вырабатываемую блок-станциями электроэнергию и пр. Положение утверждено в виде стандарта предприятия ГПО «Белэнерго».

Газификация низкосортных топлив в пульсирующем слое

Бокун И.А.

Белорусский национальный технический университет

Оптимальным вариантом газификации твердых топлив можно считать газификацию в псевдооживленном слое.

Однако не все виды топлива легко могут переходить в состояние псевдооживления, так как в слое могут образовываться каналы, через которые уходит окислитель, не вступив в контакт со слоем. Кроме того, в процессе псевдооживления некоторых видов топлив в слое могут образовываться спеченные агломераты, что интенсифицирует процесс шлакования и нарушает режим газификации и псевдооживления. Среди сравнительно новых технологий воздушной газификации твердого топлива заслуживает внимание процесс газификации пылевидного топлива в пульсирующем потоке, в котором создаются колебания газового столба, содержащего угольную пыль, что приводит к возникновению больших относительных скоростей газа и твердых частиц. Этот метод характеризуется неравномерностью подачи аэрозмеси, неудачной работой аэродинамических клапанов и др.

К новым процессам газификации твердого топлива на воздушном дутье можно отнести процесс газификации в пульсирующем слое. При рассмотрении эффективности процесса газификации твердого топлива в пульсирующем слое необходимо учитывать влияние пульсации на гидродинамический характер взаимодействия газового потока со слоем, тепло- и массообмен в нем и на особенности протекания химических реакций газообразования.

Энергия прерывистого потока газа затрачивается: на преодоление трения частиц друг с другом, на трение слоя со стенкой аппарата, на трение газового потока со слоем зернистого материала, на изменение кинетической энергии газа и расширение слоя. Эти составляющие суммарной энергии не равноценны: по-видимому, наибольшей является затрата энергии на преодоление трения газа о поверхность частиц.

Дальнейшее повышение скорости вызывает перемещение частиц слоя и сопротивление слоя почти не изменяется, оставаясь меньшей чем для псевдооживленного слоя. Течение пульсирующего (прерывистого) потока газа через слой зернистого материала при прямоугольной формуле пульсации рассматривается как периодически возникающие гидравлические удары на участке пульсатор-слой.

Принятие инвестиционных решений в энергетике на основе качественных критериев

Баранников А.И., Куприк А.В.

Белорусский национальный технический университет

Наиболее представительной моделью современной англоязычной школы принятия решений, в частности инвестиционных, является аналитический процесс иерархий (Analytic Hierarchy Process, более известный как АНР), созданный Томасом Л. Саати (1990).

При принятии инвестиционных решений, в частности в энергетике, количественные факторы должны рассматриваться одновременно с другими факторами, качественными, оцениваемыми при помощи техники опросов модели АНР.

Проблема возникает при интеграции количественных и качественных критериев, что очень важно в большинстве актуальных проблем инвестирования, в которых к обычному денежному исчислению следует добавить оценку стратегических аспектов, имеющих последствия для результата действия и поэтому, критичными в момент принятия решения, и хорошо известными своей неопределенностью.

Модель АНР с модификациями позволяет определить альтернативы для любых категорий.

Определив как v_{ik} экономическую стоимость альтернативы i относительно критерия k (например, общая стоимость), имеем

$$A_k = \{a_{ijk}\} = \left\{ \begin{matrix} v_{ik} \\ v_{jk} \end{matrix} \right\} \Rightarrow \{w_{ijk}\} = \left\{ \frac{v_{ik}}{\sum_{i=1}^n v_{ik}} \right\},$$

при знании v_{ik} достигается совершенная согласованность.

Если y_k – экономическая стоимость на единицу критерия k , совершенная согласованность также позволяет определить относительные веса каждого критерия:

$$n_k = y_k / \sum_{k=1}^n y_k.$$

Литература

1. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 315 с.

Эконометрическая модель выбора оптимальных направлений использования белорусских бурых углей в энергетике республики

КРАВЧЕНКО В.В., НАГОРНОВ В.Н.

Институт экономики НАН Беларуси

Белорусский национальный технический университет

В настоящее время имеющиеся в Беларуси запасы бурого угля не используются из-за низкого качества, больших затрат на добычу и охрану окружающей среды. Однако по мере роста цены на импортируемые энергоресурсы появляется экономическая целесообразность вовлечения бурых углей в энергобаланс страны [1]. Учитывая отсутствие опыта на добычу и недостаточную разведанность месторождений, возникает неопределенность в принятии решений по добыче и переработке углей.

Результатом решения поставленной задачи является извлечение максимальной прибыли из одинакового количества добытого топлива при минимизации затрат на использование. Целесообразно применять критерий максимизации прибыли, позволяющий рассматривать варианты с различными технологическими схемами, сравнивать варианты не только с разными количествами однотипной продукции, но и отличающиеся по видам.

В общем виде задачу можно сформулировать следующим образом:

$$f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n a_i x_i \rightarrow \max,$$

где n – количество видов i -й продукции; $a_i x_i = \Pi_{\text{год } i}$ – прибыль от реализации годового объема i -й продукции;

$$\Pi_{\text{год } i} = (\Pi_i^{\text{уд}} - C_i^{\text{уд}}) V_{\text{год } i},$$

при ограничениях по каждому варианту

$$\sum_{i=1}^n b_i x_i \leq B_{\text{год}}^{\text{доб}}, \quad x_i \leq V_i, \quad x_i \geq 0 \quad (i = \overline{1, n}) \quad (\text{неотрицательности}),$$

где $\Pi_i^{\text{уд}}$ – цена единицы i -й продукции; $C_i^{\text{уд}}$ – себестоимость единицы i -й продукции; $V_{\text{год } i}$ – годовой объем реализуемой продукции; b_i – удельный расход исходного топлива на единицу i -й продукции; $B_{\text{год}}^{\text{доб}}$ – годовой объем добычи бурых углей.

Литература

1. Директива Президента Республики Беларусь от 14 июня 2007 г. № 3 «Экономия и бережливость – главные факторы экономической безопасности государства» // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. – 2007. – № 146.

Проблемы энергоемкости белорусского ВВП

МАНЦЕРОВА Т.Ф., КРАВЧУК Е.А.

Белорусский национальный технический университет

Главной стратегией в проблеме увеличения эффективности экономики Республики Беларусь является обеспечение повышения ВВП без увеличения использования ТЭР с максимальным уменьшением импорта энергоносителей. К 2002 г. энергоемкость ВВП по сравнению с 2005 г. должна снизиться на 60 %. Именно такая задача поставлена в Директиве Президента № 3, где экономия и бережливость названы главным фактором экономической безопасности государства.

Пока в Беларуси энергоемкость ВВП в 1,5–2 раза выше, чем в развитых странах со сходными климатическими условиями. Среди основных причин низкой энергоэффективности можно выделить: неэффективное теплоснабжение в крупных городах (потери в теплоцентралях достигают до 30 %); наличие энергоемких отраслей промышленности с устаревшим оборудованием; неэффективные генерирующие мощности на ТЭЦ (по тем же причинам); государственную тарифную политику, дестимулирующую энергосбережение и прочее. Наконец, это результат общего отсутствия структурных реформ, вследствие чего промышленные предприятия не в состоянии находить средства частных инвесторов для модернизации и кардинального изменения политики.

На общее потребление первичной энергии на единицу ВВП в Беларуси лучше, чем у наших соседей по СНГ. Отношение общего потребления энергии к ВВП в Республике Беларусь снижается с 1,64 в 2001 г. до 1,29 в 2007 г. благодаря принимаемым правительством усилиям.

В Беларуси есть большие резервы в сфере энергосбережения. В начале 1990 годов затраты топлива составляли 780 кг, нефтяного эквивалента на 1 тысячу \$, а по результатам 2007 г. Беларусь достигла уровня 340 кг. В России и на Украине этот показатель составляет соответственно 580 кг и 420 кг. По оценке, в 2008 году показатель достиг 310 кг, а в 2010 году Республика Беларусь должна выйти на 270 кг. Но в Германии и Японии затраты топлива не превышают 140 кг на 1 тысячу \$. Субъектам хозяйствования Республики Беларусь есть над чем работать, чтобы внедрять современные энергоэффективные технологии и снижать издержки.

Меры по повышению эффективности использования энергоресурсов

Сологуб Н.А.

Белорусский национальный технический университет

Среди основных причин низкой энергоэффективности можно выделить: неэффективное теплоснабжение в крупных городах, наличие энергоемких отраслей промышленности с устаревшим оборудованием, неэффективные генерирующие мощности на ТЭЦ, а также государственная тарифная политика, дестимулирующая энергосбережение.

Для повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в первую очередь необходимо внедрять энерготехнологические установки и модернизировать технологические процессы и оборудование, а также вводить в эксплуатацию энергоисточники на местных видах топлива. Следует поэтапно выводить из эксплуатации светильники, используемые для освещения производственных зданий и наружного освещения, с показателями энергетической эффективности ниже установленных в государственных стандартах.

Для повышения уровня использования вторичных энергоресурсов (ВЭР) необходимо разработать план мероприятий по увеличению использования ВЭР (в том числе избыточного давления) и модернизации котельного оборудования с учетом экономической целесообразности.

В регионах нужно провести реконструкцию и капитальный ремонт тепловых сетей и систем теплоснабжения, индивидуальных тепловых пунктов, предварительно проведя комплектацию эти объекты изолированными трубами. Исключить ввод в эксплуатацию нового котельного оборудования, работающего на природном газе (кроме котельного оборудования ГПО «Белэнерго»), с удельным расходом топлива на отпуск тепловой энергии более чем 161 кг у.т./Гкал, а в дальнейшем более 160 кг у.т./Гкал.

Снижению энергоемкости продукции должно способствовать установление нормативов расхода ТЭР на производство тракторов, автомобилей, стекла и изделий из него, минеральных удобрений, переработку нефти и газового конденсата, транспортировку нефти, выпуск химических волокон и нитей.

Перечисленные меры будут способствовать повышению эффективности использования ТЭР.

Приоритетные направления энергосбережения

КУПРИК А.В.

Белорусский национальный технический университет

Одним из приоритетных направлений является увеличение использования собственных энергоресурсов. В республике поставлена задача обеспечить в 2012 году не менее 25 % объема производства электрической и тепловой энергии за счет использования местных видов топлива, отходов производства, брикетов из лигнина и торфа, вторичных энергетических ресурсов и альтернативных источников энергии. Например, за январь–октябрь 2009 года доля местных видов топлива в котельно-печном топливе республики составила 20,4 %, при годовом задании 19,4 %.

Значительный потенциал энергосбережения имеется во всех отраслях: в реальном секторе экономики, ЖКХ, в социально-бюджетной сфере, сельском хозяйстве. У каждой отрасли свои особенности, но есть и одинаковые проблемы. Например, и в промышленности, и в ЖКХ существуют котельные, которые проектировались в советские времена и являются слишком мощными, не соответствуя сегодняшним потребностям производства. Оборудование работает с недозагрузкой, низким КПД, следовательно, нерационально расходуются энергоресурсы. Поэтому необходима установка нового современного оборудования либо передача нагрузки от данного энергоисточника на ТЭЦ Минэнерго. Еще один вариант – совместно с выработкой тепловой производить электрическую энергию (когенерация). Современные технологии позволяют вырабатывать электроэнергию с удельными расходом 150–170 г у.т. на 1 кВт·ч. Устанавливая такое оборудование, тем самым замещают выработку на конденсационных станциях – Березовской и Лукомльской ГРЭС, где удельный расход составляет от 300 до 320 г у.т. на выработку 1 кВт·ч.

Также важными направлениями является внедрение регулируемого электропривода на механизмах с переменной нагрузкой, выравнивание графика электрических нагрузок за счет оптимизации системы дифференцированных во времени суток тарифов на электроэнергию, создание мини-ТЭЦ на базе котельных, использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии; осуществление государственного надзора за рациональным использованием топливно-энергетических ресурсов; разработка государственных научно-технических программ энергосбережения.

Индикаторы энергетической безопасности ТЭС

НАГОРНОВ В.Н., КРАВЧЕНКО В.В.

Белорусский национальный технический университет
Институт экономики НАН Беларуси

Учитывая специфику исследования, касающегося непосредственно генерирующих источников ЭЭС доминирующей составляющей энергетической безопасности становится надежность работы оборудования тепловых электростанций. Из комплекса индикаторов энергетической безопасности предложенного в [1] наиболее существенными для тепловых электростанций можно назвать: доля ТЭС, способных работать на двух и более взаимозаменяемых видах топлив; износ основных производственных фондов (ОПФ); обеспеченность запасами топлива; отношение инвестиций в предприятие к стоимости ОПФ.

Концепция энергетической безопасности отдельных теплоэлектростанций может осуществляться основе анализа деятельности электростанции и обычно включает стратегический анализ внутренней и внешней среды.

Для более полного выявления индикаторов энергетической безопасности теплоэлектростанций составим матрицу элементов SWOT-анализа, включающую в себя сильные стороны, слабые стороны, возможности и угрозы.

На основе SWOT-анализа сформируем структуру индикаторов, характеризующих энергетическую безопасность ТЭЦ: 1) износ основных производственных фондов ТЭЦ и тепловых сетей (процентов); 2) обеспеченность запасами топлива относительно нормативных в период отопительного сезона (процентов); 3) отношение объема инвестиций в ТЭЦ и тепловые сети к стоимости основных производственных фондов (процентов); 4) выработка электроэнергии по теплофикационному циклу относительно всей произведенной электроэнергии на ТЭЦ (процентов); 5) протяженность тепловых сетей на единицу теплоты (км/Гкал); 6) отношение себестоимости теплоты на ТЭЦ относительно средней себестоимости теплоты на котельных (процентов); 7) затраты энергии на перекачку теплоносителя (кВт·ч/Гкал); 8) коэффициент централизации теплоснабжения (процентов); 9) потери энергии в тепловых сетях (процентов).

Литература

1. Концепция энергетической безопасности Республики Беларусь: Указ № 433 Президента Республики Беларусь, 17 сентября 2007 г. // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. – 2007.

Перспективы использования мини-ТЭЦ на древесном топливе

НАГОРНОВ В.Н., КУКСОВ А.С.

Белорусский национальный технический университет

Экономическая целесообразность строительства и дальнейшей эксплуатации мини-ТЭЦ на древесном топливе главным образом зависит от соотношения рыночных цен на топливно-энергетические ресурсы. Сегодня ситуация складывается таким образом, что положительное сальдо между стоимостью природного газа и древесного топлива обеспечивается стабильно. Это связано с тем, что, согласно межправительственному соглашению Республики Беларусь и Российской Федерации, стоимость природного газа для нашей страны будет поступательно расти и к 2011 году достигнет рыночного значения.

Даже в ценах 2009 года на природный газ и курсе 2993 \$/руб. стоимость 1 т у.т. древесины значительно ниже.

Кроме того преобразование котельных в мини-ТЭЦ и сооружение энергетических блоков, сжигающих древесину, на уже существующих ТЭЦ позволит за счёт их участия в совокупном графике электрической нагрузки разгрузить в его пиковую части конденсационные мощности теплофикационных электростанций, удельный расход топлива на которых составляет более 400 г у.т./кВт·ч, а в полупиковой части – снизить форсированные нагрузки системообразующих КЭС (удельный расход топлива в среднем 332 г у.т./кВт·ч).

Положительное влияние малой энергетики на обеспечение энергетической безопасности Республики и на суммарную эффективность выработки энергии Белорусской энергосистемой очевидно. Однако помимо всего этого развитие малой энергетики на базе древесного топлива подразумевает значительный социальный эффект, главным образом заключающийся в создании дополнительных рабочих мест на периферии. Формирование у лесных хозяйств дополнительной экономической заинтересованности в очистке лесов от бурелома и кустарников в определённой мере будет способствовать улучшению экологической обстановки в этой части экосистемы.

Литература

1. Концепция энергетической безопасности Республики Беларусь: Указ № 433 Президента Республики Беларусь, 17 сентября 2007 г. // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. – 2007.

Особенности использования светодиодного освещения в промышленности

МАНЮКЕВИЧ А.В.

Белорусский национальный технический университет

Для нашего государства забота об энергосбережении является одним из магистральных направлений развития. Энергосбережение позволит снизить себестоимость и повысить ценовую конкурентоспособность нашей продукции. Ресурсы энергосбережения на промышленных предприятиях далеко не исчерпаны. Появляются новые технологии. Одной из таких технологий является светодиодные системы освещения.

Сейчас, примерно пятая часть всей произведенной электроэнергии расходуется на освещение. Широкое применение светодиодного оборудования позволит существенно сократить этот показатель за счет высокого коэффициента полезного действия этих светильников.

Световое оборудование на базе светодиодов – легкое, компактное, оно удобно при установке и эксплуатации. Внедрение светодиодов, по мнению специалистов, становится одним из самых перспективных направлений на рынке осветительной техники.

Эти осветительные приборы имеют огромные преимущества перед привычными лампами накаливания, люминесцентными и галогенными лампами. Благодаря своей экономичности и эффективности, светодиодные светильники существенно потеснили позиции традиционного осветительного оборудования. Показатели светоотдачи достигают 145 люмен с одного ватта. Для сравнения, люминесцентная лампа выдает не более 80 люмен с ватта.

Срок эксплуатации светодиодных светильников достигает 100 тысяч часов. Это примерно равно 25 годам службы. К этому необходимо добавить высокую механическую прочность и надежность. Ведь в светодиодных светильниках отсутствует такой хрупкий и ненадежный элемент как стеклянная колба.

Пожалуй, единственной причиной сдерживающей использование светодиодных светильников является высокая цена. Однако, в ближайшее время наше государство перейдет на мировой уровень цен на энергоносители. Поэтому, срок окупаемости при использовании данных светотехнических приборов станет таким, что их использование в промышленном освещении можно рассматривать, как актуальное направление энергосбережения.

Проблема формирования центров финансовой ответственности

Климкович Н.И.

Государственный институт управления и социальных технологий БГУ

В условиях рыночных отношений одним из эффективных способов управления является управление через центры финансовой ответственности. Центр финансовой ответственности (ЦФО) представляет собой структурное подразделение внутри организации, возглавляемое конкретным лицом, принимающим управленческие решения и несущим за них ответственность.

Внедрение системы управления через ЦФО следует начинать с бизнес-диагностики организационной структуры, включающей определение структуры бизнеса (видов хозяйственной деятельности, основных видов реализуемой продукции, работ и услуг), анализа структуры процессов по каждому направлению бизнеса и изучение характеристики и тесноты связей между бизнес-процессами, действующими в организации.

После проведения бизнес-диагностики организационной структуры и описания бизнес-процессов следует приступить к формированию системы ЦФО, т. е. определить соответствующие типы ЦФО и методы эффективного управления ими.

Совокупность ЦФО образуют финансовую структуру организации, строящуюся и формирующуюся по принципу ответственности каждой финансовой единицы только за те результаты деятельности, на которые она может оказывать влияние.

Управление через ЦФО опирается на систему учета по центрам ответственности, для каждого из которых устанавливаются целевые и контрольные показатели, отражающие его финансово-хозяйственную деятельность. Сравнение плановых и фактических значений установленных для каждого ЦФО показателей определяет эффективность их работы. Так же для каждого ЦФО составляется бюджет, формат и информационное содержание бюджетной формы, а также оценивается их исполнение.

Отчетность по ЦФО должна быть оперативной, содержать информацию об отклонениях и предоставлять доступ к этой информации для последующего анализа. Отчеты должны строиться так, чтобы отклонения от бюджета, утвержденного для ЦФО, могли быть отнесены на ответственное лицо.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработка и функционирование эффективной системы управления через центры финансовой ответственности включает в себя последовательность этапов, формирующих центры ответственности и определяющих сферу их полномочий.

Тенденции развития сферы электронных платежей

ПОНКРАТЬЕВА Т.В.

Расчетный центр Национального банка РБ

В связи с включением в платежный процесс огромного числа предпринимателей и физических лиц, возникла необходимость предоставления удобного средства передачи платежных инструкций в обслуживающий банк в электронном виде. Внедрение он-лайн-услуг для физических лиц сдерживалось дороговизной систем «Клиент-банк» и только с появлением Интернет-банкинга эта проблема была решена.

Удобство и эффективность использования интернет систем подтверждается и тем что в одной только Европе оборот Интернет-банкинга составляет 5 млрд. евро (по данным комитета по платежным и расчетным системам за 2008 г.).

Развитие Интернет-банкинга стимулировало в свою очередь распространение электронных денег. Бурный рост числа проектов по использованию электронных денег в Европе пришелся на 2000-е годы. Действующие проекты представлены электронными деньгами, реализованными на основе карточных технологий, но при этом существуют и электронные деньги на основе программного обеспечения. Доля рынка платежных услуг, обслуживаемых данным инструментом, колеблется от 3,9 % в Нидерландах до 0,1 % во Франции. Абсолютного рекорда достиг Сингапур – 80 %. Однако многие из проектов потерпели неудачу. Среди основных причин называется эффект зависимости от предшествующего развития или эффект QWERTY. Появлению электронных денег в развитых странах предшествовало широкое распространение других платежных систем, в первую очередь пластиковых карт. В результате более прогрессивная технология электронных денег не получила широкого распространения из-за частичной занятости данного сегмента рынка и высоких затрат на ее внедрение. Практика показывает, что устранение этого препятствия невозможно без государственной поддержки. Опыт Сингапура, где, с 2008 года электронные деньги получили официальный статус, доказывает перспективность такого вмешательства. Только за 2009 год число карт с функцией «электронного кошелька» в Сингапуре выросло на 68 %. Говоря о препятствиях, следует сказать о мошенничествах. Главный эффект от перехода к электронным системам составляющий 1,5 % ВВП (по данным VCG) в незначительной степени теряется из-за необходимости компенсации потерь от мошенничества которые составляют 1–2 % от электронного платежного оборота.

Оценка эффективности деятельности организаций

Климкович Н.И.

Государственный институт управления и социальных технологий БГУ

Анализ эффективности деятельности организаций независимо от субъекта оценки осуществляется с помощью финансовых показателей. Однако в настоящее время не существует единого обобщающего показателя, определяющего эффективность функционирования организации. Многие авторы принимают точку зрения, согласно которой эффективность деятельности организаций должна отражаться системой показателей, включающих показатели ликвидности, финансовой устойчивости, деловой активности и рентабельности.

Финансовые показатели незаменимы при расчете различных оценок стоимости бизнеса, при обосновании инвестиционных проектов, при разработке и реализации программ реструктуризации, финансового оздоровления организаций и т. д. Вместе с тем, они не могут предоставить полную информацию о всех сферах деятельности организации; не отражают информацию о проблемных или положительных факторах формирования на предприятии уровней рентабельности, ликвидности, деловой активности и т. п. Для этого необходима нефинансовая информация о вкусах и пристрастиях потребителей, квалификационном составе работников, внедрении инноваций, эффективности деятельности конкурентов, имидже и репутации организации и т. д.

Поэтому для субъектов оценки большое значение приобретает дополнительная информация о перспективах развития организации, которая закладывается в конкретных финансовых и нефинансовых индикаторах, формирующих ориентиры для управления, инвестирования, кредитования и реализации других целевых мероприятий, способствующая повышению точности прогнозов доходности и рисков.

В результате этого в последнее время в публикациях большое внимание уделяют моделям оценки эффективности, учитывающим также и нефинансовые показатели, таким как матрица измерения эффективности, пирамида деятельности компании К. Мак-Найра, Р. Линча и К. Кросса, сбалансированная система показателей Р. Каплана и Д. Нортон, модель стратегических карт Л. Мейселя, система EP2M (Effective Progress and Performance Measurement – оценка эффективности деятельности и роста) К. Робертса и П. Адамса, призма эффективности Э. Нили, К. Адамса и М. Кеннерли. Наибольшее применение из перечисленных моделей в настоящее время получила сбалансированная система показателей как наиболее проработанная и отрегулированная модель оценки эффективности.

СЕКЦИЯ 7. Электротехника и электроника

УДК 621.316.35

Альтернатива критической длине пролета

БЛАДЫКО Ю.В.

Белорусский национальный технический университет

Под воздействием механической нагрузки и температуры окружающей среды в проводах воздушных линий (ВЛ) и распределительных устройств (РУ) возникают механические напряжения. Они не должны быть больше допустимых при трех наиболее опасных условиях: при наименьшей температуре; при наибольшей нагрузке (с гололедом и ветром); при средне-эксплуатационных условиях. С помощью трех критических пролетов определяют, какой из трех указанных условий нужно принимать в качестве исходного условия в уравнении состояния провода. При пролетах ВЛ до 500 м уравнение цепной линии заменяется уравнением параболы. При более длинных пролетах следует учитывать три первых слагаемых разложения в ряд гиперболических функций. Расчеты на ЭВМ показывают, что при малых пролетах большее напряжение возникает при наименьшей температуре, при больших пролетах – при наибольшей нагрузке. Однако уравнение состояния провода не учитывает конструктивные особенности: гирлянды изоляторов (натяжные и подвесные) и гололед на них, шлейфы к соседним пролетам, распорки, а для РУ – отпайки. Решение уравнений статики гибких проводов реализовано в компьютерных программах MR, позволяющих определить стрелы провеса и тяжение проводов и оптических кабелей под действием гололедных и ветровых нагрузок. Программы учитывают разность высот подвеса, конструктивные особенности РУ и ВЛ. Последняя версия пакета программ MR № 2.20 имеет одну интегрирующую Windows-оболочку, подключающую собственно программы механического расчета, файлы исходных данных, каталоги проводов и гирлянд изоляторов. Расчет проводов может выполняться в 12-ти климатических режимах. Число исходных режимов может быть равным 1 или 2. При двух исходных режимах программа выбирает более тяжелый режим климатических нагрузок, при котором усилие от ошиновки на опорные конструкции максимальны. Указанный режим принимается за исходный. В этом режиме по заданному тяжению или стреле провеса производится расчет длины гибкой ошиновки до растяжения, которая является основой для расчета остальных режимов. Критические длины пролета ВЛ, рассчитанные по программе, отличаются от решения уравнения состояния не более чем на 1 %.

Методы расчета выпрямителей

Бладыко Ю.В., Мазуренко А.А.

Белорусский национальный технический университет

При работе на нагрузку, потребляющую небольшие токи от выпрямителя, часто используют фильтры, включающие конденсатор; в наиболее простом виде – это *C*-фильтры. Такие фильтры для выпрямителя представляют емкостную нагрузку, которая заметно изменяет характер процессов в вентильном комплекте.

Существующие методы расчета выпрямителя ориентированы на ручной счет, поэтому они основаны на целом ряде допущений и упрощений. Так, например, в литературе допускается, что диоды идеальные, также не учитываются все предвключенные сопротивления (сопротивления трансформатора, линии электропередачи). Метод Б.П. Терентьева, применяемый в проектной практике, основывается на допущении, что емкость конденсатора фильтра бесконечно большая, вследствие чего напряжение на нагрузке можно считать постоянным по величине.

Новейшие компьютерные технологии сегодня позволяют выполнять решение систем дифференциальных уравнений численными методами. Ранее авторами предлагался дифференциальный метод расчета выпрямительных схем с численным решением в MathCAD.

Для нахождения сглаженного напряжения необходимо найти напряжение на конденсаторе, для чего используется расчет переходных процессов классическим методом. Расчет сводится к решению системы дифференциальных уравнений по законам Кирхгофа. Затем находят принужденные составляющие сглаженного напряжения, что в дальнейшем приводит к решению трансцендентных уравнений.

Авторами разработан алгоритм расчета среднего значения напряжения выпрямителя с емкостным фильтром, работающего на активную нагрузку, с учетом конечных значений емкости конденсатора фильтра и сопротивления фазы выпрямителя.

Разработана программа расчета на ЭВМ среднего значения выпрямленного сглаженного напряжения. Результаты расчета по программе сравнивались с результатами, полученными по существующим методикам и опытным путем. Указаны пределы применимости упрощенных методов. Отмечено хорошее совпадение результатов с экспериментальными данными.

Механический расчет гибких отпайк к электрическим аппаратам

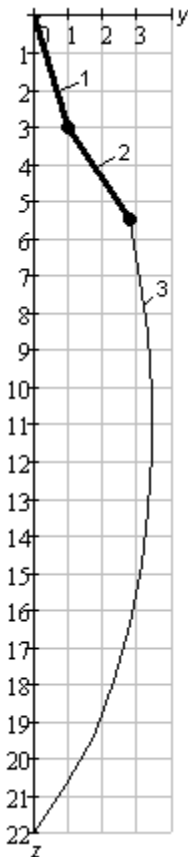
БЛАДЫКО Ю.В.

Белорусский национальный технический университет

Провода отпайк монтируются практически без натяжения (рис. 1), поэтому они представляются нерастяжимой нитью, для которой известно аналитическое решение задачи в общем виде:

$$\bar{R} = \bar{a}_1 + \frac{1}{P} \left(\bar{a}_0 - \bar{P} \frac{\bar{a}_0 \bar{P}}{P^2} \right) arsh \frac{P^2 s - \bar{a}_0 \bar{P}}{\sqrt{a_0^2 P^2 - (\bar{a}_0 \bar{P})^2}} - \frac{\bar{P}}{P^2} |\bar{a}_0 - \bar{P} s|;$$

$$\bar{T} = \bar{a}_0 - \bar{P} s; \quad 0 \leq s \leq l_0,$$



где \bar{a}_0 , \bar{a}_1 – постоянные векторы интегрирования; \bar{T} – вектор тяжения по длине отпайки; l_0 – длина отпайки; s – длина дуги; \bar{P} – суммарный вектор сил, приложенных к единице длины провода; P , a_0 – модули векторов \bar{P} и \bar{a}_0 .

Частные решения можно получить путем нахождения по заданным граничным условиям конкретных значений постоянных векторов \bar{a}_0 и \bar{a}_1 . Граничными условиями для проводов отпайк являются их длина, а также радиус-векторы, описывающие положение точек их крепления к электрическим аппаратам и проводам сборных шин. Подставив граничные условия и преобразовав для метода Вегстейна, получим трансцендентные уравнения для определения постоянных векторов \bar{a}_0 и \bar{a}_1 .

Вектор силы, действующий от отпайки на провод, равен $\bar{Q}_0 = \bar{a}_0$, а усилие от отпайки на электрический аппарат определяется как $\bar{Q}_a = \bar{P} l_0 - \bar{a}_0$.

Рис. 1. Положение проводов в плоскости, перпендикулярной пролету (провода 4×ПА-500 при длине пролета 79,6 м и скорости ветра 18 м/с):
1 – натяжные гирлянды изоляторов; 2 – провода пролета;
3 – отпайка к электрическому аппарату

Негативное влияние нелинейной однофазной нагрузки на трехфазную сеть и способы ее защиты

ГАВРИЛЕНКО С.Д.

Белорусский национальный технический университет

Компьютеризация организаций, комплексных офисных зданий привела к возникновению проблемы влияния компьютеров, как нелинейной электрической нагрузки, на трехфазную сеть. Это объясняется тем, что потребляемый компьютером ток имеет ярко выраженный импульсный характер. При приближении кривой питающего напряжения к максимальному значению электронные вентиля диодного моста импульсного источника питания скачкообразно изменяют свое сопротивление от бесконечности до некоторого малого значения. При определенном соотношении долей линейных и нелинейных потребителей электроэнергии возникают негативные явления в электросети: токи в нулевых рабочих проводниках из-за гармоник, кратных трем, могут превышать токи в фазных проводах в полтора и более раза; вершина синусоидального питающего напряжения срезается, становится «плоской». Следствием этого может стать перегрев и разрушение нулевых рабочих проводников кабельных линий; генерация электромагнитных помех; увеличение тепловыделения в элементах системы электроснабжения. Для предотвращения негативных последствий, необходимо оснащать офисные здания оборудованием, на котором в настоящее время потребитель экономит средства. Во-первых, использование импульсных блоков питания (ИБП) с трехфазным входом и однофазным выходом. Такие ИБП могут иметь на входе шестипульсный выпрямитель (схема Ларионова), который выпрямляет не фазное, а линейное напряжение. При этом нейтральный провод разгружен, гармоники, кратные трем, отсутствуют, нагрузка равномерно распределяется по фазам. Применение в ИБП двенадцатипульсного выпрямителя позволяет дополнительно устранять пятую гармонику, понизить требуемую мощность дизельгенератора, питающего ИБП (если он есть). Второй путь предусматривает применение трансформаторов серии ТСТ (трансформаторы симметрирующие трехфазные). При применении ТСТ однофазная нагрузка воспринимается сетью как трехфазная, что также устраняет вышеперечисленные негативные последствия. Совместное использование трехфазных ИБП и ТСТ позволит усилить защиту трехфазной сети от нелинейной однофазной нагрузки.

Особенности электромагнитных процессов в трансформаторных агрегатах электромагнитных установок

Сончик Л.И.

Белорусский национальный технический университет

В электропечных установках отдельные контуры системы электропитания содержат нелинейные элементы, что приводит к искажению формы кривых токов и напряжений в электрических сетях. Нелинейными элементами являются электрические дуги печей, выпрямительные агрегаты, статические преобразователи частоты, тиристорные блоки со встречно-параллельным включением вентилялей.

Искажение формы кривых токов можно трактовать как генерацию высших гармоник. Несинусоидальные токи обуславливают падение напряжения на элементах питающей сети, что приводит к искажению формы кривой питающего напряжения и на других приемниках электрической энергии.

Другой причиной появления высших гармонических составляющих в токах и напряжениях электропечных установок является трансформаторный агрегат, состоящий из печного трансформатора и токоограничивающего реактора для печей малой емкости или из регулирующего автотрансформатора и печного трансформатора для печей большой емкости.

Характер электромагнитных процессов трансформаторных агрегатов определяется конструкцией магнитопровода и схемой соединения обмоток трансформатора. В настоящее время наибольшее применение получили магнитопроводы планарной конструкции. В режимах эксплуатационных коротких замыканий, при отключениях и включениях установок искажается форма кривой тока с появлением в ней нечетных гармоник. Наибольшее влияние на форму кривой тока оказывает третья гармоника, амплитуда которой может достигать 50–60 % от амплитуды первой гармоники. Это указывает на необходимость разработки конструкций трансформаторных агрегатов для электропечных установок.

Совместимый протокол передачи данных в АСКУЭ

ШЕМАРОВ А.И.

Белорусский национальный технический университет

Автоматизированная система коммерческого учёта электроэнергии АСКУЭ в современный период развития находят всё более широкое применение. Часто новые системы строятся на базе существующих систем, где возможно применение устаревшего оборудования, использующего различные протоколы передачи данных. Оборудование может использовать недокументированные сервисные функции, прерывающее работу основных протоколов. Оборудование часто не поддерживает протокол запрос-ответ, то есть асинхронно передаёт данные в сеть без внешней синхронизации. Для решения проблемы унификации подключения разнородного оборудования к сети передачи данных, выполняемой на базе модулей – преобразователей АТЮФ 468.152.001, был разработан совместимый протокол передачи данных, позволяющий работать с разнородным оборудованием. Сеть работает в режиме «запрос-ответ». Запросы формирует контроллер, работающий в режиме «Master». В нем организуются виртуальные порты для каждого опрашиваемого устройства. Непосредственное управление оконечным оборудованием осуществляется контроллером, работающем в режиме «Slave». Контроллер, работающий в режиме «Master» периодически опрашивает контроллеры, работающие в режиме «Slave». Каждый передаваемый оконечным оборудованием байт данных контроллер «Slave» в протоколе сопровождает цифровыми данными, которые в относительном формате кодируют интервал времени между принятыми байтами данных. В контроллере, работающем в режиме «Master», происходит накопление данных в буферах виртуальных COM-портов, откуда они передаются в специализированные программы в темпе поступления их в виртуальные порты для последующей обработки.

Предлагаемый протокол позволяет использовать в системе разнородное оборудование, что повышает универсальность системы и расширяет возможности её применения. Также, за счет введения в структуру передаваемых данных относительных интервалов времени, передаваемые в сети служебные пакеты носят случайный характер для систем анализа зашифрованных пакетов данных, передаваемых по сети. Корреляционный анализ их становится весьма затруднительным.

Исследование обеззараживающего действия импульсного электрического разряда в воде

Крутов А.В., БОРОВСКАЯ В.В., ШУХНО А.А.

Белорусский государственный аграрный технический университет

Электрический разряд в жидкости приводит к появлению ударных волн, распространяющихся со звуковой и сверхзвуковой скоростью, возникновению ультразвуковых колебаний, генерации электромагнитного излучения в инфракрасном, видимом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах спектра, ионизации соединений и элементов, содержащихся в жидкости. Эти факторы оказывают на жидкость и находящиеся в ней микроорганизмы и другие объекты, разнообразные физико-химические воздействия. Обеззараживающее действие импульсного электрического разряда в воде проявляется путем воздействия ударной волны и ультрафиолетового излучения на микроорганизмы, а также расщепления биологически активных веществ, аминокислот, белков и других высокомолекулярных соединений под действием свободных атомов и радикалов, образующихся в зоне разряда. Установлено, что бактерицидное действие на микробную клетку отмечается при энергии разряда не менее 60–80 Дж и носит комплексный характер. Определение преимущественного влияния на микрофлору того или иного фактора электрического разряда является пока сложной задачей. Однако экспериментальные исследования показывают, что обеззараживающий эффект зависит от конструкции разрядного промежутка, параметров импульсного разряда (тока, напряжения, скважности импульсов, его формы и крутизны).

Структурная схема обеззараживающей установки состоит из следующих основных частей: разрядного блока, генератора импульсных токов, источника питания. Импульсный режим обеспечивается со следующим параметрами: амплитуда импульсного напряжения 1,8 кВ, импульсная мощность порядка 50 кВт, длительность импульса 10 мкс. Энергия импульса составляет 80 Дж. Расстояние между электродами в эксперименте – 1 мм. При импульсном разряде в воде ударная волна зарождается и формируется в непосредственной близости от оси разряда и распространяется в радиальном направлении от центра. Перепад давления оценивается в пределах 100–150 МПа и более. В связи с этим следует предусмотреть соответствующую прочность стенок емкости и обеспечить компенсацию возникающего давления.

Особенности динамических процессов в электрических цепях с обратными топологическими вырождениями

ГОРОШКО В.И.

Белорусский государственный технологический университет

В классической теории электрических цепей рассмотрены особенности описания динамических процессов в цепях с топологическими вырождениями типа индуктивное сечение или емкостный контур и установлено, что каждая независимая структура этого типа вызывает понижение на единицу порядка дифференциального уравнения цепи.

«Обратные» топологические структуры типа индуктивный контур или емкостное сечение допускают независимое задание начальных условий ($I_L(0)$ или $U_C(0)$) для каждого реактивного элемента структуры и при стандартном подходе не происходит редукции порядка дифференциального уравнения. Для краткости упоминаемые «обратные» структуры в дальнейшем обозначаем как ОТВ (обратные топологические вырождения).

Можно доказать, что характеристическое уравнение цепи с ОТВ имеет нулевые корни. Для доказательства используется анализ узлового или контурного определителя. Все ненулевые элементы строки соответствующей вырожденной структуре содержат множитель p , который выносится за знак определителя, т. е. дает нулевой корень.

Для ОТВ типа LE -контур доказана теорема о потокоцеплении контура (ПК-теорема). LE -контур в общем случае содержит индуктивности и ЭДС $e(t)$. Для ОТВ типа CJ -сечение формулируется дуальная теорема о заряде сечения (ЗС-теорема). CJ -сечение наряду с емкостями может содержать источники тока $J(t)$.

Каждая из теорем позволяет одну из переменных линейно выразить через остальные переменные ОТВ и таким образом исключить из уравнений динамики. Эта процедура понижает порядок дифференциального уравнения. Нулевой корень характеристического уравнения свидетельствует о наличии статического тока в LE -контуре (петлевой ток) или статического заряда в CJ -сечении (узловой заряд).

Процедура понижения порядка дифференциального уравнения фактически изменяет «статус» петлевого тока или узлового заряда: вместо статически свободных составляющих они становятся установившимися составляющими, поскольку определяются правой частью дифференциального уравнения.