

РАБОТА ЩЕТОК С ТЕФЛОНОВЫМ ПОКРЫТИЕМ НА КОЛЛЕКТОРНЫХ МАШИНАХ

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований работы инновационных щеток с тефлоновым покрытием на коллекторах машины постоянного тока; отмечается некоторое улучшение условий коммутации. При этом выявлены некоторые замечания технологического плана.

Ключевые слова: щетка, коммутация, безыскровая зона, коллектор, тефлон, вольт-амперная характеристика.

Одним из способов улучшения токосъема, уменьшения износа щеток и повышения их стабильности в работе является применение тефлона. Особенностью этого материала, отличающей его от других полимеров, является устойчивость к температурам, практически ко всем химически агрессивным средам, к свету, погодным условиям, к горячему водяному пару. Тефлон характеризуется высокой антифрикционной способностью, он не горюч и не гигроскопичен, обладает хорошими диэлектрическими свойствами. При этом у тефлона низкая износостойкость и плохая склеивающая способность.

Тем не менее на данный момент разработана технология нанесения тефлона на щеточный материал и щеткодержатели и осуществлена на экспериментальных щетках [1].

Были проведены экспериментальные исследования инновационных щеток. Изучалось влияние тефлонового покрытия на вольт-амперные характеристики щеточного контакта (ВАХ). Также исследовались коммутационные свойства щеток при работе на коллекторе.

Исследования показали, что применение тефлонового покрытия положительно воздействует на работу щеток коллекторных электрических машин. Но нет четкого объяснения механизма влияния тефлона на работу коллекторно-щеточного узла.

Условия токосъема в основном определяются процессом коммутации, который определяется характером ВАХ. Были проведены исследования ВАХ металлографитных щеток Н7 и электрографитированных щеток ЭГ-54 с покрытием из тефлона на сбегающем крае и без него при различных скоростях вращения коллектора и температурах щеточного контакта.

На рис. 1 приведены ВАХ для щеток с тефлоном и без него (добавление буквы Т к марке щетки указывает покрытие тефлоном).

При теоретических исследованиях коммутации свойства щеточного контакта учитываются на основе ВАХ щеток. Более высокая коммутающая способность у тех щеток, которые обеспечивают большие значения падения напряжения при высоких плотностях тока на сбегающем крае щетки.

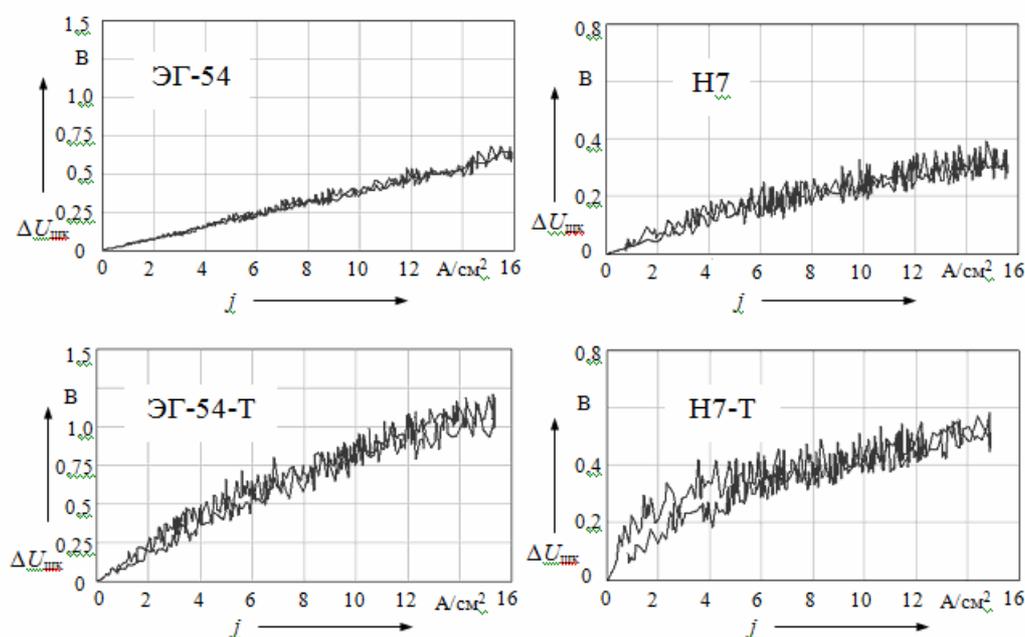


Рис. 1. ВАХ катодных щеток при $t = 50^\circ\text{C}$ и $n = 1500$ об./мин

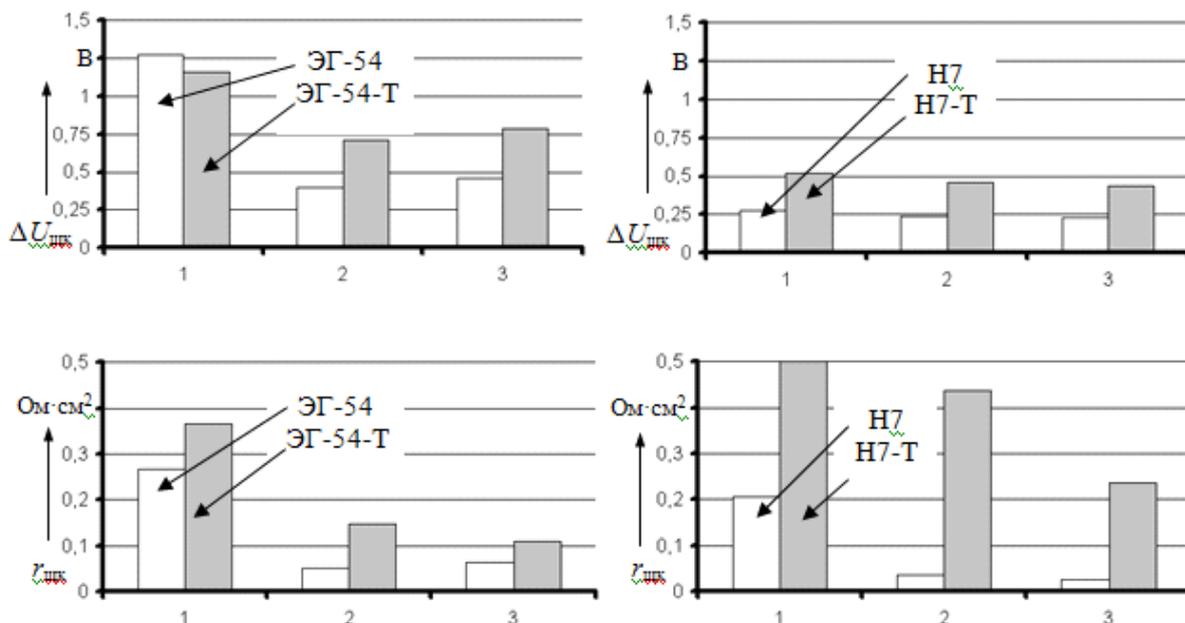


Рис. 2. Диаграммы значений падения напряжения и сопротивлений катодных щеток

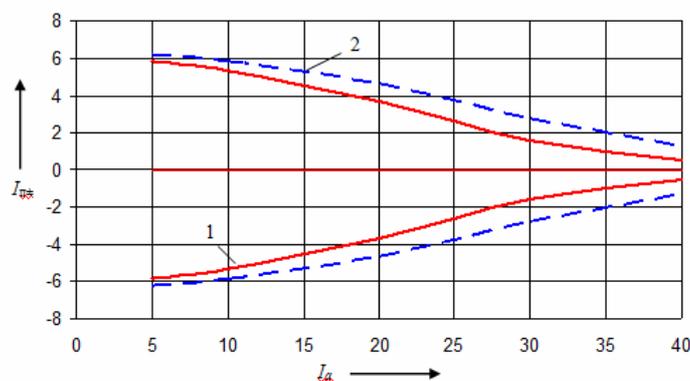


Рис. 3. Расчетные безыскровые зоны

Важное значение для исследования коммутационного процесса имеют величина падения напряжения в контакте и крутизна начальной части ВАХ. Поэтому в качестве сравнительной оценки характеристик для различных условий эксперимента приняты параметры $\Delta U_{щ}$ и $r_{щ}$.

Для удобства и наглядности сравнения параметров щеток на основе полученных ВАХ были построены диаграммы значений падения напряжения $\Delta U_{щ}$ и величин сопротивления $r_{щ}$ анодных и катодных щеток при различных температурах контакта. Пример таких диаграмм приведен на рис. 2 (1 – 30 °С, 2 – 50 °С, 3 – 80 °С), из которого видно, что нанесение тефлона на сбегающий край щетки оказывает определенное влияние на их вольт-амперные характеристики.

Колебание значений падения напряжения обусловлено не только механическими факторами работы коллекторно-щеточного узла, но и неоднородностью структуры политуры.

Для количественной оценки и сравнения коммутационных свойств машин постоянного тока применяется метод безыскровых зон. При оценке влияние тефлонового покрытия на коммутирующие способности щеток, использовалось математическое описание зон безыскровой работы машины постоянного тока на стадии ее проектирования с использованием

аппроксимации ВАХ щеточного контакта $\Delta U = A \cdot \arctg(B \cdot j)$; $\Delta U = (\text{sign}j)(OA + kj)$ [2].

Для этого построены безыскровые зоны (рис. 3) с использованием ВАХ щеток ЭГ-54 (1) и ЭГ-54-Т (2) для следующих условий: напряжение секции $U_c = 0,65$ В, ЭДС самоиндукции секции $E_L = 1,5$ В, напряжение срезки $U_{cp} = 2,8$ В, номинальный ток якоря $I_{ан} = 20$ А.

Из рис. 3 видно, что теоретическая безыскровая зона, построенная на основании ВАХ щетки с тефлоновым покрытием, шире, чем зона для той же щетки, но без него. На основании этого можно сделать вывод, что коммутационная устойчивость электрической машины, работающей с тефлоновыми щетками, выше, чем со стандартными.

Для оценки влияния щеток с тефлоновым покрытием на токосъем, кроме анализа ВАХ, были получены реальные безыскровые зоны [3]. В эксперименте использовались щетки ЭГ-74 и ЭГ-74-Т (с тефлоновым покрытием). Для данного исследования была использована установка со следующими параметрами: $P_n = 4$ кВт; $U_n = 220$ В; $n = 1500$ об./мин; $I_n = 22$ А (рис. 4).

На машине были установлены четыре щетки, две положительных и две отрицательных, на одной из которых установлен датчик искрения (Д). Сигнал с этого датчика подается на индикатор искрения, где

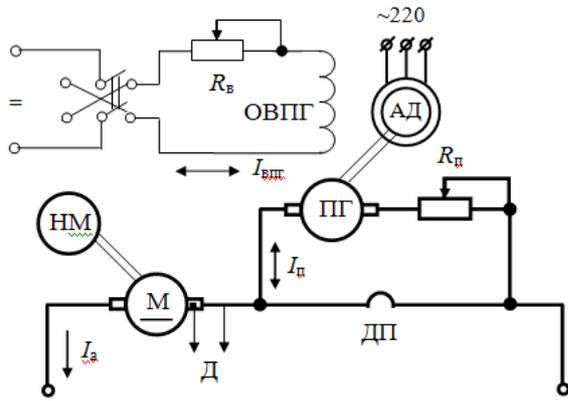


Рис. 4. Схема для снятия области безыскровой работы

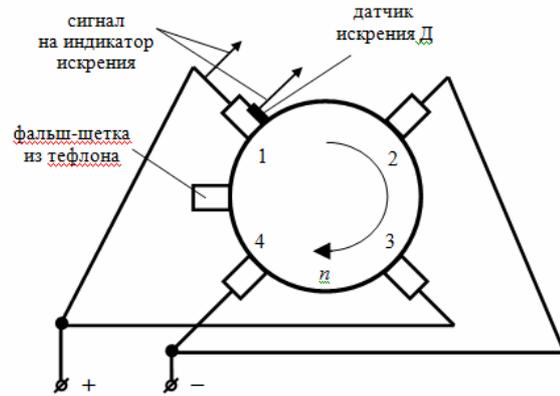
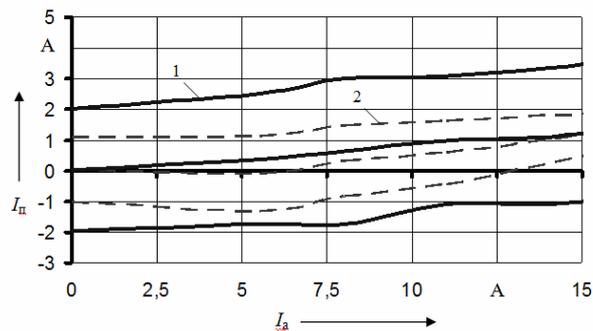


Рис. 5. Схема расположения щеток на испытательной установке

Рис. 6. Область безыскровой работы машины:
1 — щетки с тефлоном; 2 — щетки без тефлона

он обрабатывается, и фиксируется уровень искрения на щетке машины как от недо-, так и от перекоммутации (рис. 5). Все испытания проводились в режиме генератора при одной температуре коллектора $t = 35-40^\circ\text{C}$, частоте вращения $n = 1380$ об./мин.

Для оценки влияния тефлона на безыскровые зоны были проведены исследования при различных комбинациях щеток: комплект стандартных щеток; половина комплекта стандартных щеток; комплект щеток с тефлоновым покрытием; половина комплекта щеток с тефлоновым покрытием; половина комплекта стандартных щеток и половина с тефлоновым покрытием; комплект стандартных щеток и тефлоновая фальш-щетка; половина комплекта стандартных щеток и тефлоновая фальш-щетка.

Использование половины комплекта стандартных щеток с половиной щеток с тефлоновым покрытием на сбегающем крае, а также дополнительной фальш-щеткой из тефлона заметных изменений в безыскровые зоны и на работу машины в целом не внесли. При замене же комплекта стандартных щеток на комплект щеток с тефлоновым покрытием безыскровая зона работы машины получилась более широкая (рис. 6). Эксперименты повторялись неоднократно с разнесением по времени.

В результате полученного опыта в этих экспериментах были отмечены некоторые особенности: нанесение тефлона на сбегающую грань щетки, кроме ее сужения, приводит к смещению положения щеток на геометрической нейтральной. В соответствии с этим приходилось устанавливать датчик искрения на краю фактической щетки, то есть смещать на толщину тефлона от сбегающего края. Также было отмечено, что при значительном искрении происходит подгорание края щетки с отделением тефлона.

При анализе многочисленного экспериментального материала исследования щеток с новым скользящим контактом — тефлоновым покрытием на сбегающем крае получены определенные обобщающие выводы, основанные на принципе сравнения работы щеток с тефлоновым покрытием и без него при одних и тех же условиях.

Щетки с тефлоновым покрытием имеют несколько большие значения падения напряжения при номинальной плотности тока и обладают большим значением сопротивления.

Установка комплекта щеток с тефлоновым покрытием вместо стандартных щеток приводит к некоторому увеличению коммутационной устойчивости работы испытуемой машины.

Одним из недостатков щеток с тефлоновым покрытием на сбегающем крае является несовершенная технология нанесения тефлона на щетку. При температурах контакта выше 100°C тефлон отслаивается от щетки. Отслоение тефлона от щетки возможно и при притирке щеток к коллектору.

Проведенные экспериментальные исследования не позволили раскрыть механизм воздействия тефлона на формирование политуры коллектора. Для этого требуются специальные исследования. Однако, учитывая, что тефлон является изоляционным материалом с износными характеристиками, близкими к щеточному материалу, можно предположить, что в данном случае тефлон играет роль легкого абразивного материала, который удаляет с поверхности коллектора продукты износа щеточного материала, тем самым повышает падение напряжения в контакте.

Результаты исследований подтверждают эффективность применения тефлона. Планируется, при имеющихся общих положительных результатах,

продолжить исследования по следующим направлениям: дальнейшее совершенствование технологии нанесения тефлона на поверхность щеточного материала; проведение эксплуатационных испытаний щеток с тефлоновым покрытием на коллекторных машинах постоянного тока на предмет их коммутационной устойчивости и износных характеристик.

Библиографический список

1. Chmelik K. Kluzny kontakt v elektrickych strojich / K. Chmelik, F. Veselka. — Ostrava : KEY Publishing s. r. o., 2007. — 256 p.
2. Петров, П. Г. Совершенствование технологии анализа вольт-амперных характеристик щеточного контакта электрических машин / П. Г. Петров, А. Г. Бородулин // Повышение эффективности работы железнодорожного транспорта : сб. науч.

ст. аспирантов ун-та. — Омск : ОмГУПС, 2007. — Вып. 8. — С. 128–133.

3. Авилов, В. Д. К вопросу об использовании тефлона при работе щеток электрических машин / В. Д. Авилов, П. Г. Петров // Проблемы и достижения в промышленной энергетике : материалы 8-й науч.-техн. конф. с междунар. участием. — Екатеринбург, 2008. — С. 104–107.

ПЕТРОВ Павел Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и общей электротехники.
Адрес для переписки: petrovomgups@mail.ru, emoeomgups@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.03.2015 г.

© П. Г. Петров

УДК 621.316.1

Е. А. ТРЕТЬЯКОВ

Омский государственный
университет путей сообщения

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Как известно, повышение энергоэффективности системы электроснабжения железных дорог может достигаться на основе измерений информативных параметров и реализации согласованных управляющих воздействий на исполнительные устройства регуляторов, позволяющие обеспечить заданные показатели надежности, качества электроэнергии и уровня потерь в реальном режиме времени. Решение комплекса вопросов, связанных с регулированием параметров режима в системе электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог для повышения экономичности и надежности передачи и распределения электроэнергии, представляется весьма актуальным. Предложены и реализованы на модели методы интеллектуального управления режимами в системе электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог, обеспечивающие повышение надежности, качества электрической энергии и снижения потерь.

Ключевые слова: система электроснабжения, нетяговые потребители, регулирование параметров режима, координация управляющих воздействий, интеллектуальный регулятор.

Постановка задачи. Электроснабжение нетяговых потребителей крупных железнодорожных станций и узлов (объекты инфраструктуры, в том числе локомотивного и вагонного хозяйства, культурно-бытовые объекты, сторонние потребители и др.) осуществляется непосредственно от подстанций электроэнергетических систем 110/6(10)/0,4 кВ или от тяговых подстанций 220 (110)/35/10 кВ. Электроснабжение нетяговых железнодорожных потребителей, расположенных на железнодорожных перегонах и железнодорожных станциях, находящихся на межподстанционных зонах (освещение промежуточных станций, остановочных пунктов, линейно-путевых зданий, устройств автоблокировки и др.), осуществляется, как правило, от линий продольного электроснабжения 6, 10, 35 кВ или от районных электросетей.

В настоящее время основой управления параметрами режима системы электроснабжения железных

дорог является оперативно-диспетчерское управление переключениями, выполняемое персоналом.

Между тем повышение энергоэффективности системы электроснабжения железных дорог может достигаться на основе измерений информативных параметров и реализации согласованных управляющих воздействий на исполнительные устройства объектов системы электроснабжения железных дорог, позволяющие обеспечить заданные показатели надежности, качества электроэнергии и уровня потерь в реальном режиме времени.

Режим работы сети характеризуется рядом параметров, которые можно изменять (регулировать). К их числу относятся активные и реактивные нагрузки потребителей (линий), нагрузки и ток линий тяговой и распределительной сети, напряжение в узлах электрической сети, уровень искажений напряжений.

Ряд авторов [1] применительно к управлению режимами системы тягового электроснабжения,

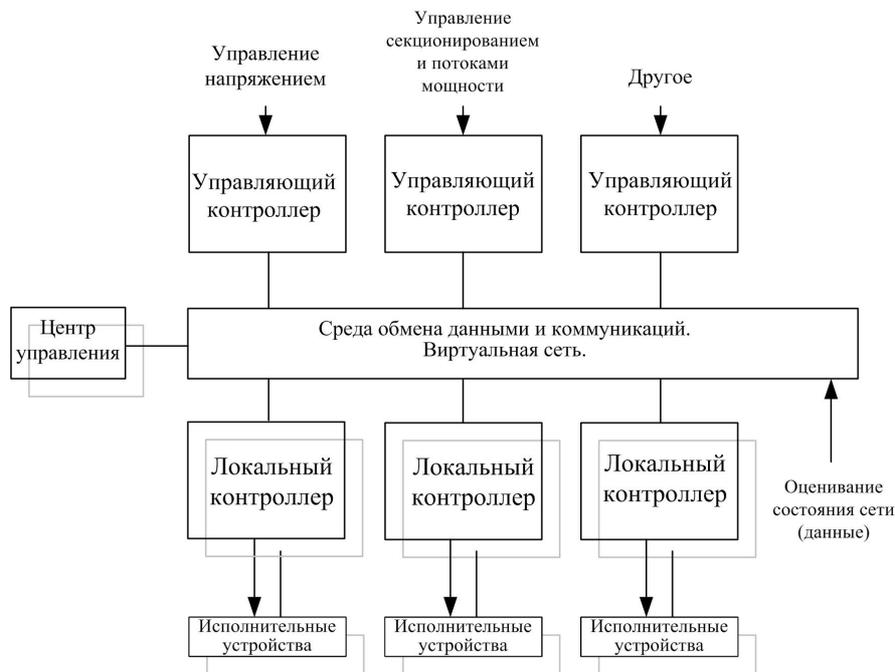


Рис. 1. Архитектура управления системой электроснабжения железных дорог для целей регулирования параметров режима

развивают известный метод ситуационного управления, основанный на введении понятия ситуации, классификации ситуаций и их преобразований. Количество состояний (классов) текущего режима электрической сети зависит от количества конфигураций топологии сети, переменных параметров режима или управляемых объектов системы электроснабжения (с учетом значений критериев разбиения). При невозможности отнести состояние системы к какому-либо классу синтезируется новый класс состояний.

Недостатком такого подхода является грубое усреднение параметров режима (и управляющих воздействий) внутри кластера из-за конечного числа сценариев управления и централизованный подход к управлению, исключающий регулирование параметров режима в реальном времени. Ситуационное управление вполне себя оправдывает, если существует управляющий орган (как правило, на базе контроллера), который выполняет мгновенные, дискретные действия, а если действия имеют продолжительность и могут накладываться друг на друга, то ситуационное исчисление становится довольно громоздким.

Зачастую при регулировании параметров режима электрической сети, в частности напряжения, используют устройства с применением fuzzy – логики [1], при этом осуществляется усреднение влияющих на напряжение факторов с использованием математического аппарата нечеткой логики для целей управления. В результате напряжение в конкретной точке распределительной сети может не соответствовать предъявляемым требованиям.

Классическим подходом к регулированию параметрами режима электрической сети является работа [2], согласно которой регулирование напряжения осуществляется в центре питания (с использованием РПН) в соответствии с условиями, требуемыми для той группы однородных потребителей, которые имеют наибольшую долю в общей нагрузке линий, присоединенных к данному центру питания. Для обеспе-

чения должного качества напряжения у остальных потребителей, получающих питание от этого центра питания, должны использоваться средства местного регулирования напряжения. Нескоординированная работа таких средств не может обеспечить заданные параметры режима.

Поэтому для разрешения представленных недостатков существующих подходов и развития перспективных требуется разработка методов оперативного управления системой электроснабжения железных дорог на основе современных технологий представления и обработки знаний (баз знаний) и онтологий, а также мультиагентного подхода [3, 4], основанного на измерениях информативных параметров и реализации управляющих воздействия в реальном времени во всех режимах, а также алгоритмов взаимодействия и координации элементов управляющей системы для реализации согласованных воздействий на исполнительные устройства объектов системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог, позволяющие обеспечить заданные параметры надежности, качества электроэнергии и уровня потерь в реальном режиме времени.

Предлагаемые решения. Предлагаемый подход к регулированию параметров режима включает в себя архитектуру с распределенными центрами принятия решений (управляющие контроллеры-агенты-координаторы) на основе измерений и высокоскоростного анализа с помощью вычислительных средств на базе мультиагентных систем (рис. 1); необходимые датчики электрических (напряжения, токи, мощность, коэффициент мощности, показатели качества электроэнергии и т.п.) и неэлектрических величин (положение коммутационных аппаратов, отпаек РПН, ПБВ, вольтодобавочных трансформаторов, ступеней компенсирующих устройств и т.п.); локальные контроллеры исполнительных устройств. Все датчики, локальные и управляющие контроллеры соединены через информационные каналы по своим протоколам к виртуальной модели сети в границах энергодиспетчерского пункта ОАО «РЖД» (с воз-

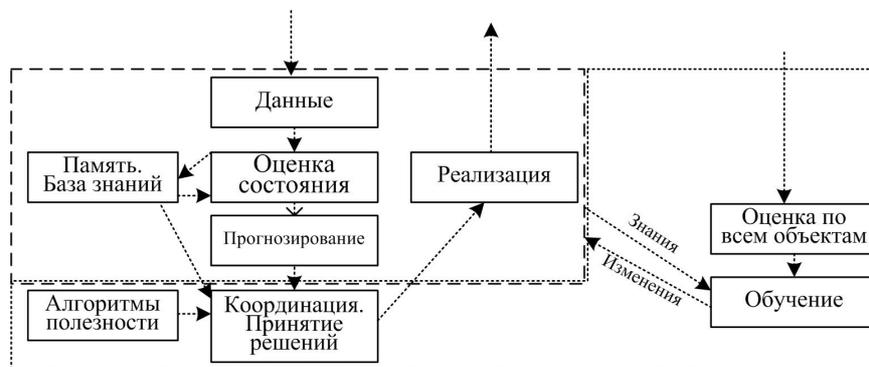


Рис. 2. Структура управляющего контроллера

возможностью получения и обмена данными с соседними энергодиспетчерскими пунктами). Виртуальная модель сети содержит все зеркальные данные о сети, которые обновляются с получением новых данных. Она позволяет реализовать взаимодействие элементов сети в системе управления с различными протоколами передачи данных.

Математическое обобщенное описание состояния системы управления электроснабжением железных дорог можно представить в виде:

$$f(X_{\text{наС}}, R_{\text{нФ}}) = 0, \quad (1)$$

где $X_{\text{наС}}$ — вектор переменных состояний параметров режима (узловые напряжения и фазы, токи, мощности и т.п.); $R_{\text{нФ}}$ — вектор состояний контроллеров исполнительных устройств объектов управления.

Выдача управляющих воздействий на исполнительные устройства объектов электроснабжения осуществляется как в автоматическом режиме, так и в результате действий энергодиспетчера, который осуществляет свои функции в центре управления системой электроснабжения.

В качестве локальных контроллеров-агентов исполнительных устройств выступают локальные контроллеры оборудования (локальное управление регулируемыи компенсирующими устройствами, РПН трансформаторов, фильтр-устройств, накопителей, коммутационных аппаратов и т.д.). Локальные контроллеры могут работать автономно, получая данные непосредственно в месте подключения и/или из виртуальной модели сети, на основе своих заданных целей и в составе системы управления электроснабжением, получив задание от распределительного контроллера для достижения глобальной цели, т.е. координированно.

Управляющие контроллеры выступают в качестве агентов-координаторов, реализованы по функциональному признаку, например, контроллеры управления напряжением, управления секционированием и потоками мощности, управления качеством электроэнергии и др.

Управляющий контроллер содержит (рис. 2) средства обработки данных от датчиков, локальных контроллеров, центра управления и включает в себя оценку состояния — идентификацию параметров сети (топология: путем анализа измерений на наличие соединения линий, параметры элементов схемы), параметры режима — напряжения узлов, перетоки мощностей и токов в ветвях, мощности генерации, накопления и потребления в узлах, ограничения на параметры режима. Далее, с учетом базы знаний, которая содержит модели процессов, критерии

и ограничения, как заложенные, так и полученные из опыта и прогнозирования, происходит принятие решений по управлению системой электроснабжения железных дорог, основанное на алгоритмах полезности функционирования объекта (например, алгоритм минимума потерь в сетях) по результатам координации с другими управляющими контроллерами и определяется величина управляющих воздействий, которая передается локальным контроллерам для реализации исполнительными устройствами.

Для представления онтологии используется семантическая сеть, которая состоит узлов и упорядоченных отношений (связей), соединяющих эти узлы. Онтология регулирования параметров режима содержит концепты, атрибуты и отношения применительно к конкретному объекту. Примеры концептов: подстанция, линия, средство регулирования и т.п. Атрибуты, например, линии: сечение, марка кабеля, ток, мощность, напряжение и т.п. Отношения, например логики 1-го порядка применительно к линии: если ток линии превысит ток перегрузки, то линия отключается (при невозможности изменения топологии транспорта электроэнергии) или не отключается, но происходит включение дополнительной батареи конденсаторов компенсирующего устройства и т.д. Онтология отношений описывает все возможные ситуации, в том числе с использованием теории нечетких множеств, и создает новые на основе реализации критериев обучения.

Прогнозирование особенно необходимо для целей управления переключением РПН трансформаторов, т.к. количество переключений таких систем в сутки ограничено и для повышения эффективности такого управления необходим закон изменения напряжения. Кроме этого, управляющий контроллер содержит средства координации по принципу сотрудничества или переговоры-аукциона. Координация осуществляется для достижения глобальной цели или получения максимальной отдачи от локальных систем управления (контроллеров-агентов). Например, агент начинает переговоры с другими, когда его реактивная нагрузка возрастает, а он не имеет достаточного запаса реактивной мощности, чтобы достичь локальной цели (повышения напряжения). Координация может выполняться на основе выставленных приоритетов и чувствительности к параметрам режима (например, на основе сенсорного анализа), а также ранжирования по значениям функции полезности со стороны агентов с учетом истории и прогнозных значений, например, реконфигурация топологии сети для автоматического восстановления нормального режима. Под функциями полезности пони-

необходимо продолжить моделирование на основе современных агентских платформ и специальных программных продуктов моделирования мульти-агентных интеллектуальных систем, что является целью дальнейших исследований автора.

Библиографический список

1. Оперативное управление в системах электроснабжения железных дорог : моногр. / В. П. Закарюкин [и др.] ; под ред. А. В. Крюкова. — Иркутск : ИРГУПС, 2012. — 129 с.
2. Электрические системы. В 7 т. Т. 2. Электрические сети : учеб. для электроэнергетических специальностей вузов / Под ред. В. А. Веникова. — М. : Высшая школа, 1971. — 440 с.
3. Weng B. Optimal signal reconstruction using the empirical mode decomposition // Euroasip Journal on Advances in Signal Processing, 2008, vol. 4, P. 12–18.

4. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход / С. Рассел, П. Норвиг ; пер. с англ. — М. : Издательский дом Вильямс, 2006. — 1408 с.

5. Третьяков, Е. А. Управление качеством электрической энергии в распределительных сетях железных дорог : моногр. / Е. А. Третьяков. — Омск : ОмГУПС, 2013. — 196 с.

ТРЕТЬЯКОВ Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры подвижного состава электрических железных дорог. Адрес для переписки: tretyakovea@omgups.ru, eugetnr@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.03.2015 г.

© Е. А. Третьяков

УДК 621.184.64

**И. А. ЯНВАРЕВ
В. Ю. ГРОХОТОВ
М. В. ГРОХОТОВА**

Омский государственный
технический университет

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОЭТАПНОГО ТЕПЛООБМЕНА

Эффективное использование топливно-энергетических ресурсов при эксплуатации теплоэнергетических установок является важным и актуальным. На промышленных предприятиях, использующих газотурбинные технологии, применение теплообменников-утилизаторов (ТУ) для внутреннего и внешнего теплоиспользования позволит добиться существенной экономии топливного природного газа. Комплексное решение возникающих при этом проблем может быть достигнуто на пути применения поэтапного процесса теплообмена.

Ключевые слова: теплоэнергетическая установка, теплообменник-утилизатор, поэтапный теплообмен, экономия топлива и электроэнергии.

Совершенство преобразования энергии, затраты материальных и топливных ресурсов для самого широкого спектра теплоэнергетических установок в значительной степени определяются эффективностью процессов теплообмена в газотурбинных и парогазовых технологиях, в различных энерго- и компрессорных установках, реализующих многоступенчатое компремирование и охлаждение газов [1–3].

Применение в рамках этих технологий утилизационного теплообменного оборудования позволяет использовать на промышленных предприятиях теряемую в обычной ситуации энергию уходящих газов, экономить топливо, необходимое для теплоснабжения, снизить себестоимость тепловой энергии [4–6]. В частности, теплообменники-утилизаторы (ТУ) — наиболее простой и достаточно дешевый способ для

теплоснабжения компрессорных станций (КС) магистральных газопроводов и прилегающих к ним поселков в осенне-зимний период.

В свою очередь, повышение эффективности теплообменников-утилизаторов связано с созданием новых эффективных технологических процессов поэтапного теплообмена, наиболее полно и комплексно использующих сырье и энергетические ресурсы.

В общем случае теплоэнергетические установки можно представить как совокупность элементов, основными из которых (влияющими на эффективность преобразования энергии) являются элементы для изменения давления (ступени сжатия, расширения) и элементы для изменения температуры (теплообменные системы и аппараты) в соответствующих

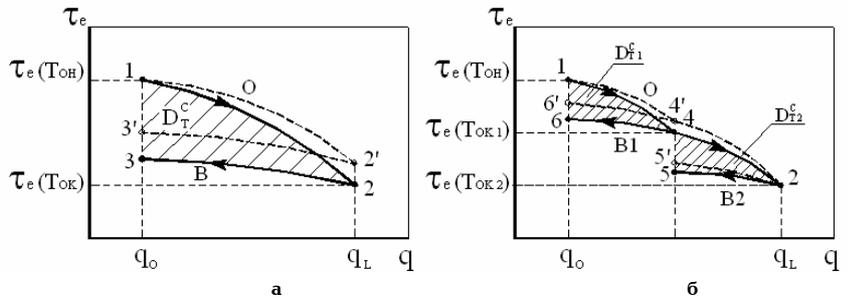


Рис. 1. Собственные потери эксергии от необратимости вследствие конечной разности температур для одноэтапного (а) и двухэтапного (б) процесса теплообмена при противоточной схеме и $A < 1$

комбинациях. Эти элементы должны обеспечивать требуемое преобразование энергии (эксергии) в соответствии с функциональным назначением установок.

С учетом современных требований по энергосбережению и экологии решение задач повышения эффективности теплоэнергетической установки в целом во многом определяется рациональным планированием теплообменных процессов и, в частности, процессов утилизации теплоты, что является важным и актуальным в настоящее время.

Обеспечение заданного уровня прироста эксергетического к.п.д. установки в рамках осуществления одноэтапного процесса теплообмена между потоками рабочих и вспомогательных сред сопряжено со значительными трудностями. В частности, повышение температурного уровня утилизирующего потока T_{BK}^{UT} может привести к дополнительным потерям по тракту движения утилизируемой среды (потери давления уходящих газов, снижение глубины охлаждения сжатого газа при утилизации теплоты сжатия), и следовательно, к дополнительным затратам. Повышение эффективности подогрева воспринимающей теплоту среды предполагает использование теплообменника как подогревателя, т.е. изменение значения отношения тепловых эквивалентов в сторону его увеличения ($A \geq 1$), тогда как для газоохладителей рекомендуется $A < 1$.

Кроме того, значительно сужены по указанным выше причинам возможности регулирования, адаптации действующего ТУ к изменяющимся условиям эксплуатации, рационального использования естественного холода окружающей среды, а также снижения потерь эксергии от необратимости при теплообмене вследствие конечной разности температур.

Комплексное решение отмеченных проблем может быть достигнуто на пути применения поэтапного процесса теплообмена.

Реализация поэтапного процесса теплообмена между основным потоком и рядом вспомогательных сред существенно расширяет, а во многих случаях и определяет возможность повышения его эффективности. Данная организация теплообмена предполагает более рациональное использование температурных напоров сред, позволяет учесть требования по энергосбережению, например, за счет утилизации теплоты уходящих газов, требования снижения водопотребления, а также обеспечить гибкость при регулировании и устойчивость систем при изменении условий эксплуатации.

Оценим теоретически возможность повышения эффективности процесса теплообмена в последнем случае с точки зрения потерь эксергии. Так, для по-

терь эксергии от необратимости при теплообмене вследствие конечной разности температур, согласно [7], можно записать

$$D_T = \sum \delta q \cdot \Delta \tau_e, \quad (1)$$

где δq — элемент теплоты, передаваемый на участке; $\Delta \tau_e = \tau_e^O - \tau_e^B$ — разность эксергетических температур элементарного участка для «О» — отдающей и «В» — воспринимающей теплообменивающихся сред; $\tau_e = 1 - T_{o.c.}/T$ — эксергетическая температурная функция; $T_{o.c.}$, T — температура окружающей среды и текущая температура теплоносителя.

Тогда, например, для противоточной схемы при отношении тепловых эквивалентов $A = G_o c_o / G_B c_B < 1$ и бесконечно большом коэффициенте теплопередачи $k \rightarrow \infty$ собственные потери эксергии D_T^c от необратимости одноэтапного процесса теплообмена, реализующего охлаждение потока отдающей среды от T_{OH} до T_{OK} могут быть определены как площадь фигуры, ограниченной линиями 1-2 и 2-3, отмеченными на q, τ_e — диаграмме (рис. 1а). В свою очередь, осуществление последовательного, поэтапного охлаждения отдающей среды первоначально до температуры T_{OK1} — линии 1-4 и 4-6, а затем до $T_{OK2} = T_{OK}$ — линии 4-2 и 2-5 определяет возможность ощутимого снижения суммарных потерь $D_{T\Sigma}^c = D_{T1}^c + D_{T2}^c$ (рис. 1б).

Собственные и технические потери D_T связаны в том числе с составом и последовательностью имеющих охлаждающих сред, что обуславливает необходимость исследования различных вариантов организации поэтапного процесса теплообмена, взаимовлияния процессов в отдельных секциях.

С другой стороны, с учетом вышесказанного снижения потерь эксергии, например, для процессов многоступенчатого сжатия и охлаждения в компрессорной установке (КУ) возможно за счет использования в технологических, отопительных и иных целях той части работы, которая затрачивается на повышение температурной составляющей эксергии E_T компримируемого газа [7]. При этом для одноэтапного охлаждения сжатого газа достижение требуемого температурного уровня утилизирующего потока сопровождается пропорциональным ростом температуры охлаждаемой среды T_{OK} на выходе из теплообменника (линии 1-2' и 2'-3', рис. 1а), что приводит к дополнительным затратам мощности при сжатии в последующей ступени компрессора.

Осуществление предварительного охлаждения сжатого газа утилизирующей теплоту средой с последующим его доохлаждением на втором этапе (линии 1-4' и 4'-2, рис. 1б) позволит обеспечить предь-

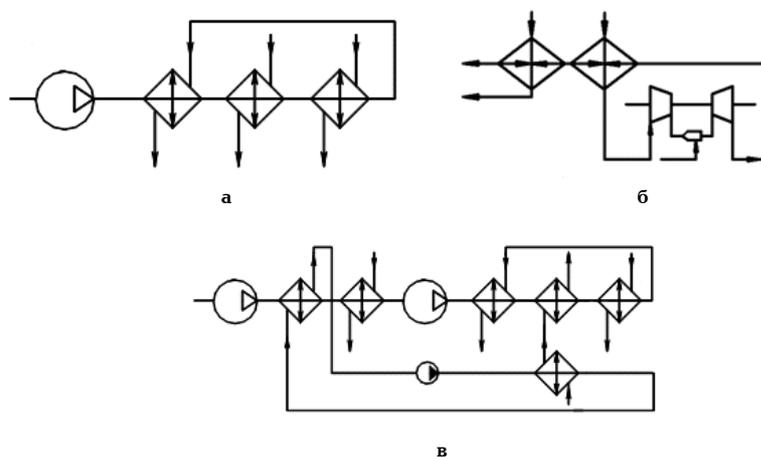


Рис. 2. Схемы установок с отдельными МГОУ (а) и МТУ (б) с взаимосвязанными промежуточными и концевыми МГОУ (в)

являемые к потокам требования и избежать необоснованных потерь. При этом в качестве определяющих для потерь D_T дополнительно можно выделить весовые доли каждого этапа, тип утилизационного потока, способы и режимы поддержания их температурных уровней и следовательно соответствующие законы изменения характеристик сред на каждом этапе в течение эксплуатации. Решение данных вопросов является в общем случае оптимизационным, где в качестве критерия можно воспользоваться эксергетическим к.п.д. установки η_e .

$$\eta_e(P) = \sum_{t=1}^T E_{KY}(P) \cdot \Delta\tau_t / \left(\sum_{t=1}^T N_{KY}(P) \cdot \Delta\tau_t \right), \quad (2)$$

где P — параметры оптимизации; E_{KYt} , N_{KYt} — эксергетическая производительность и потребляемая мощность КУ для t -го температурного уровня; $\Delta\tau_t$ — продолжительность работы КУ при t -м температурном уровне; T — число температурных уровней в году, на которые разбивается весь диапазон изменения температуры окружающей среды.

Практическая же реализация эффективной совокупности процессов поэтапного теплообмена между потоками многоступенчатой компрессорной установки может быть осуществлена в виде неоднородной в общем случае теплообменной системы (ТС) при помощи многосекционных газоохладителей утилизаторов (МГОУ), а для теплоэнергетической установки в виде теплообменной системы при помощи многосекционных теплообменников утилизаторов (МТУ), отраженных на рис. 2.

Тепловая эффективность (тепловой к.п.д.) теплообменника утилизатора (в общем случае утилизационной теплообменной системы) η^{YT} выражает соотношение между фактическим переданным количеством теплоты $Q_O = Q_B$ и тем максимально возможным количеством теплоты Q_{MAX} , которое может быть передано в идеальной теплообменнике, т.е. в теплообменнике с идеальной схемой тока (противоток) и в случае бесконечно большого значения коэффициента теплопередачи k , или бесконечно большой поверхностью теплообмена F .

$$\eta^{YT} = \frac{Q_O = Q_B}{Q_{MAX}} = \frac{F \cdot k \cdot \Delta T_O}{(Gc)_{MIN} \cdot \Delta T_{MAX}} = \frac{G_O c_O (T_{OH} - T_{OK})}{(Gc)_{MIN} (T_{OH} - T_{BH})} = \frac{G_B c_B (T_{BK} - T_{BH})}{(Gc)_{MIN} (T_{OH} - T_{BH})}, \quad (3)$$

где T_{OH} , T_{OK} , T_{BH} , T_{BK} — начальные и конечные температуры отдающей и воспринимающей тепло сред; G — массовый расход; c — теплоемкость.

Соотношение между полными теплоемкостями массовых расходов теплоносителей $A = G_O c_O / G_B c_B$ устанавливаются в зависимости от функционального назначения аппарата. Для охладителей требуется получить максимально возможную глубину охлаждения отдающего тепло потока, поэтому $A < 1$ $(Gc)_{MIN} = G_O c_O$ и, следовательно:

$$\eta^{YT} = \Phi^{YT} = \frac{T_{OH} - T_{OK}}{T_{OH} - T_{BH}} = \frac{T_{BK} - T_{BH}}{T_{OH} - T_{BH}} \cdot \frac{1}{A}. \quad (4)$$

Для нагревателей требуется как можно больше нагреть воспринимающий теплоту поток, поэтому $A > 1$ $(Gc)_{MIN} = G_B c_B$ и, следовательно:

$$\eta^{YT} = P^{YT} = \frac{T_{BK} - T_{BH}}{T_{OH} - T_{BH}} = \frac{T_{OH} - T_{OK}}{T_{OH} - T_{BH}} \cdot A. \quad (5)$$

При утилизации теплота ВЭР возвращается в $(Gc)_{MIN} = G_O c_O$ теплоэнергетическую установку (с потоком сырья, воздуха, направляемого в систему вентиляции или на сжигание топлива), или направляется к внешним потребителям (с водой для горячего водоснабжения), а оставшаяся часть теплоты выбрасывается вместе с потоком теплоносителя в окружающую среду и представляет собой потери энергии (рис. 3).

В этом случае для получения полезного эффекта (продукта, энергии) затрачивается меньшее количество топлива, поскольку часть теплоты уходящих газов (УГ) используется для подогрева сырья, топлива, воздуха, направляемого на горение, подпиточной воды и т.д.

В результате, если предполагается только регенеративное (внутреннее) теплоиспользование, изменяется к.п.д. установки $\eta^{TЭУ}$, равный отношению полезно использованной теплоты $Q_{ПОЛЗ}$ к подведенной теплоте $Q_{ПОДВ}$:

$$\eta^{TЭУ} = \frac{Q_{ПОЛЗ}}{Q_{ПОДВ}} = \frac{Q_{ПОЛЗ}}{Q_H^P \cdot B - Q_{YT} \cdot \eta^{YT}} = \frac{Q_{ПОЛЗ}}{Q_H^P \cdot B - (Gc)_{YT} (T_{OH} - T_{OK}) \cdot \eta^{YT}}, \quad (6)$$

где Q_H^P — низшая теплота сгорания топлива; B — расход топлива на работу установки без регенера-

ПОРЯДОК ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА СООТВЕТСТВИЕ ОТКЛОНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ТРЕБОВАНИЯМ ГОСТ 32144-2013

Описано проведенное испытание на ЗАО «Завод соединительных деталей». Описан способ обработки результатов экспериментальных исследований показателей качества электрической энергии средствами программного продукта в среде разработки Lab VIEW. Произведен анализ соответствия медленных отклонений напряжения на каждой фазе участка предприятия требованиям ГОСТ 32144-2013.

Ключевые слова: качество электроэнергии, отклонение напряжения, электромагнитная помеха, осциллограмма напряжений, статистическая обработка данных.

Показатели качества электроэнергии (КЭ), нормируемые ГОСТом 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» определяются случайными электромагнитными процессами в системах электроснабжения (СЭС) общего назначения, зависящими от многих случайных факторов, связаны с полем событий, характеризуются таблицами вероятностей вида [1]:

$$X_i(t) \left\{ \begin{array}{l} f(X_1), f(X_2), \dots, f(X_i), \dots, f(X_k) \\ p(X_1), p(X_2), \dots, p(X_i), \dots, p(X_k) \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где X_i — параметр электромагнитной обстановки (ЭМО) при нестандартном значении i -го показателя КЭ.

Каждый параметр электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств характеризуется в течение расчётного времени измерения множеством действительных чисел M_i непрерывно распределённых в заданных интервалах случайных величин. Согласно положениям теории множеств, это множество является точечным и конечным, потому что может быть занумеровано не более чем n числами. Оно является ограниченным, потому что каждое значение X_i ограничено снизу и сверху определёнными пределами изменения показателя КЭ, возможными в реальной электрической сети.

При измерении i -го показателя КЭ на счётных устройствах информационно-вычислительных комплексов (ИВК) устанавливаются определённое количество интервалов, которые охватывают весь диапазон изменения измеряемой величины в течение суток.

Вероятность появления кондуктивной ЭМП δX рассчитывается по формуле [2]:

$$P(\delta X) = P(X_{(-)} < X_i < X_{(+)} + P(X_{(+)} \leq X_i \leq \infty) + P(-\infty < X_i < X_{(-)}) - 0,1, \quad (2)$$

где $X_{(+)}$ — положительное отклонение величины показателя КЭ; $X_{(-)}$ — отрицательное отклонение величины показателя КЭ.

Таким образом, статистические данные показателей КЭ, полученные на ИВК, можно использовать при определении параметров кондуктивных ЭМП, распространяющихся по сетям ЭЭС; математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение и плотность вероятности распределения.

Для оценки соответствия показателей качества электроэнергии (ПКЭ) требованиям ГОСТ 32144-2013 необходимо провести испытания для определения значений ПКЭ и полученные результаты испытаний обработать. При этом рекомендуется использовать комплексный подход, который заключается в следующем [3]:

— осциллографируются данные, что позволяет после конвертации проводить их дальнейшую математическую обработку во внешних программных пакетах;

— определяются гармоники основной частоты и их гармонические составляющие;

— анализируются полученные результаты.

Испытания проводились на предприятии ЗАО «Завод соединительных деталей» в течение суток на участке со станками с ЧПУ. В течение суток испытания проводятся, так как, согласно ГОСТ 32144-2013,

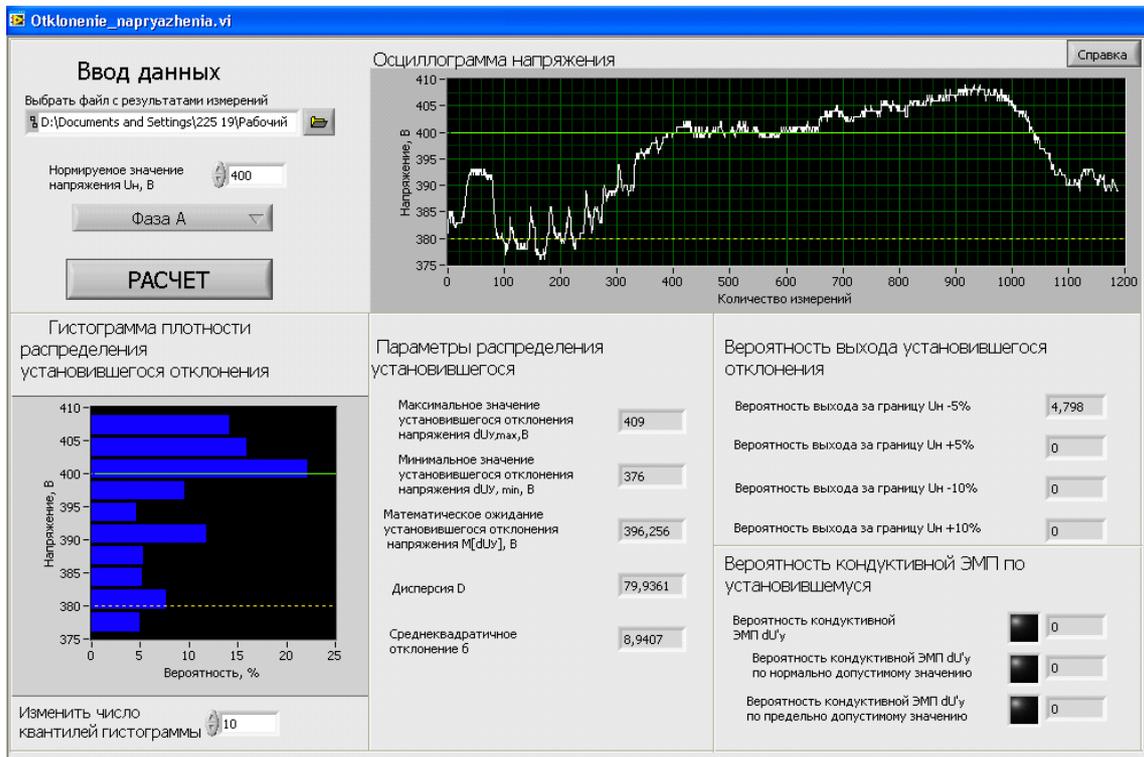


Рис. 1. Интерфейс программы по обработке результатов экспериментальных исследований показателей качества электрической энергии для фазы А на участке со станками с ЧПУ

для определения соответствия значений измеряемого отклонения напряжения устанавливается минимальный интервал времени измерений, равный 24 ч, с интервалом усреднения 60 с.

Для измерений использовался информационно-вычислительный комплекс ИВК «Омск-М» заводской номер 42. Использовались шесть измерительных каналов: три — для измерения напряжения на шинах подстанции и три — для измерения токов, подключены к вторичной обмотке измерительных трансформаторов ТА.

Проверка качества электроэнергии на соответствие требованиям ГОСТ 32144-2013 проводилась для медленных изменений напряжения δU . Для обработки результатов измерений по данному ПКЭ использовали программный продукт «Обработка экспериментальных данных показателей качества электроэнергии по установившемуся отклонению напряжения», разработанный в среде программного продукта Lab VIEW.

Предлагаемая программа позволяет создавать пользователю удобный интерфейс, получить все необходимые значения для оценки результатов измерений показателей качества электрической энергии. Кроме того, большинство современных приборов для измерения показателей качества электроэнергии, включая ИВК «Омск-М», позволяет экспортировать результаты измерений в формате MS EXCEL.

Программа позволяет вычислять такие параметры распределения значений установившегося отклонения напряжения, как математическое ожидание, дисперсия, среднее квадратическое отклонение. Математическое ожидание отклонения напряжения $M(\delta U)$ характеризует средний уровень напряжения в рассматриваемом пункте сети за контролируемый период времени.

Математическое ожидание определяется по формуле:

$$M(\delta U) = \sum_{i=1}^k \overline{\delta U}_i P_i, \quad (3)$$

где $M(\delta U)$ — математическое ожидание отклонения напряжения; k — число разрядов гистограммы; $\overline{\delta U}_i$ — значение середины i -го интервала; P_i — вероятность попадания отклонения напряжения в i -й интервал.

Рассеяние отклонения напряжения относительно математического ожидания характеризуется дисперсией. Она равна математическому ожиданию квадрата отклонений случайной величины от ее среднего значения. По гистограмме Lab VIEW дисперсию определяют по формуле:

$$D(\delta U) = \sigma^2(\delta U) = \sum_{i=1}^k [(\overline{\delta U}_i)^2 P_i] - [M(\delta U)]^2, \quad (4)$$

где $\sigma(\delta U)$ — среднее квадратическое или стандартное отклонение напряжения.

Для проведения статистической обработки экспериментальных данных, полученных при помощи ИВК «Омск-М», в программе предлагается сначала экспортировать данные измерений в документ Microsoft Excel. После этого следует сохранить полученные данные как текстовые файлы (с разделителями табуляции).

Для анализа результатов полученных расчетов необходимо установить нормируемое значение напряжения $U_n = 400$ В, выбрать фазу, для которой будет рассчитываться отклонение напряжения. Число квантилей гистограммы установили равным 10. Интерфейс программы по обработке результатов экспериментальных исследований показателей качества электрической энергии представлен на рис. 1.

Данный интерфейс получен для каждой фазы на участке со станками с ЧПУ. Осциллограммы напряжений на участке со станками с ЧПУ показаны на рис. 2, а гистограммы плотности распределения мед-

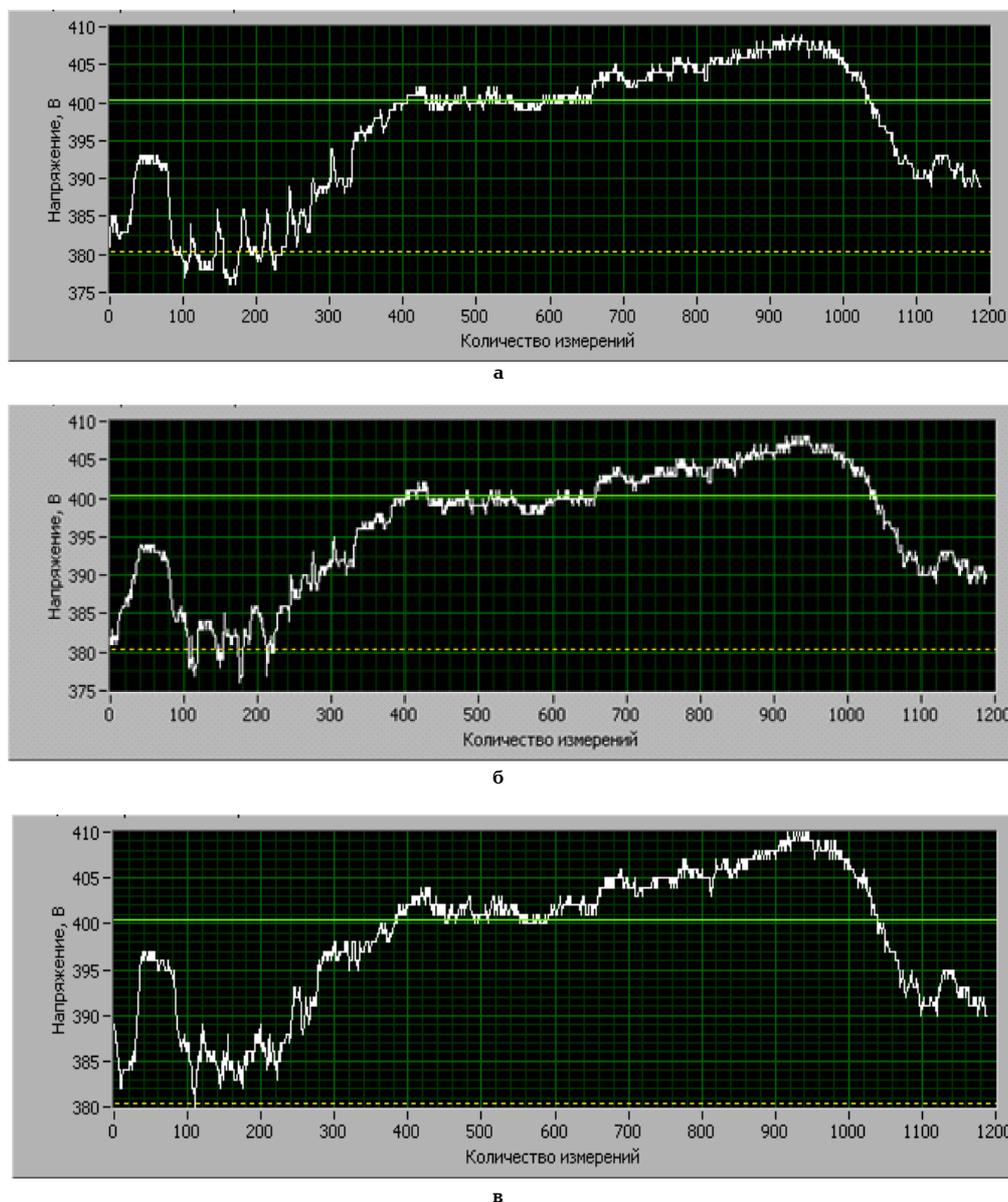


Рис. 2. Осциллограммы напряжений на участке со станками ЧПУ за сутки:
а — на фазе А; б — на фазе Б; в — на фазе С

ленных отклонений напряжения для каждой фазы на участке со станками с ЧПУ показаны на рис. 3.

При выполнении статистической обработки результатов измерений случайная величина отклонения напряжения δU представляется в виде гистограммы, в которой число квантилей выбирается таким образом, чтобы граница квантиля совпадала с границей нормируемого значения, а их количество было минимальным для заданной точности расчета.

Параметры распределения значений отклонения напряжения на фазе А следующие:

- математическое ожидание $M[U]=396,256 В$;
- дисперсия $D=79,94$;
- среднее квадратическое отклонение $\sigma[U]=8,94 В$.

Параметры распределения значений отклонения напряжения на фазе В следующие:

- математическое ожидание $M[U]=396,444 В$;
- дисперсия $D=61,40$;
- среднее квадратическое отклонение $\sigma[U]=7,84 В$.

Параметры распределения значений отклонения напряжения на фазе С следующие:

- математическое ожидание $M[U]=398,481 В$;
- дисперсия $D=55,82$;
- среднее квадратическое отклонение $\sigma[U]=7,47 В$.

На фазе А и В наблюдается вероятность выхода отклонения напряжения ниже номинального значения соответственно на 4,798 % и 1,852 % соответственно, что, в соответствии с ГОСТ 32144-2013, меньше допустимого значения (10 %); на фазе С вероятность выхода отклонения напряжения ниже номинального не наблюдается. Вероятность выхода отклонения напряжения выше номинального значения на всех фазах равно 0. Соответственно, и вероятность кондуктивной электромагнитной помехи на фазе А, В и С равны 0. Следовательно, на данном участке наблюдается соответствие отклонения напряжения по ГОСТ 32144-2013.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- 1) программный продукт позволил создать удобный интерфейс по обработке результатов экспериментальных исследований медленных отклонений напряжений для каждой фазы на участке со станками с ЧПУ;

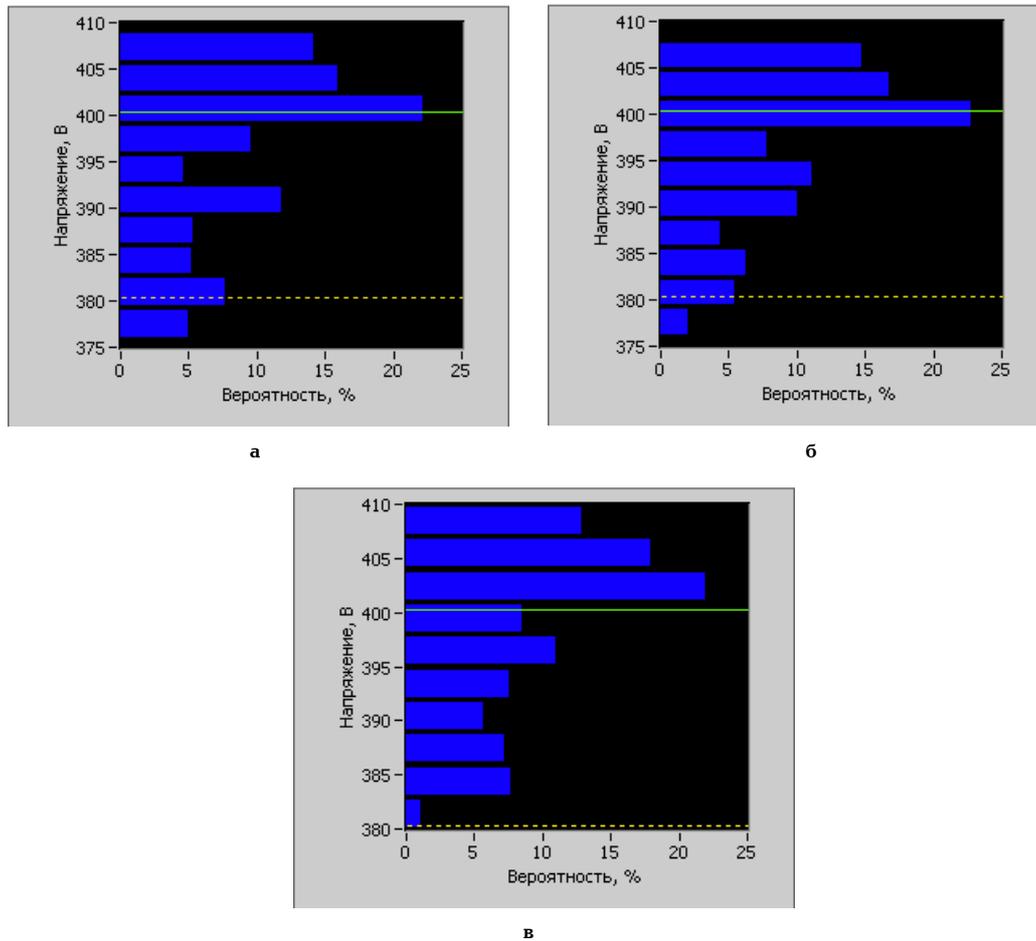


Рис. 3. Гистограммы плотности распределения медленных отклонений напряжения на участке со станками ЧПУ: а — на фазе А; б — на фазе Б; в — на фазе С

2) при обработке данных с помощью программного продукта выявлено соответствие медленных отклонений напряжения ГОСТу 32144-2013 на участке со станками с ЧПУ на ЗАО «Завод соединительных деталей».

Библиографический список

1. Руппель, А. А. Кондуктивные электромагнитные помехи в электрических сетях 6–10 кВ / А. А. Руппель, Е. В. Иванова ; под ред. В. П. Горелова. — Омск : Омский филиал НГАВТ, 2004. — 284 с.
2. Антонов, А. И. Анализ проведения испытаний на соответствие установившегося отклонения напряжения требованиям ГОСТ 54149-2010 [Текст] / А. И. Антонов, Ю. М. Денчик, Д. А. Зубанов, В. И. Клеутин, А. А. Руппель, А. С. Никишкин // Научные проблемы Сибири и Дальнего Востока. — 2014. — № 4. — С. 210–213.
3. Зубанов, Д. А. Обработка результатов экспериментальных исследований показателей качества электрической энергии средствами программы lab VieW [Текст] / Д. А. Зубанов,

В. И. Клеутин, А. А. Сидоренко [и др.] // Сб. науч. тр. ОИВТ. — 2012. — № 10. — С. 118–122.

АНТОНОВ Александр Игоревич, ассистент кафедры «Электротехника и электрооборудование» Омского института водного транспорта (ОИВТ), (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта (СГУВТ).

ДЕНЧИК Юлия Михайловна, кандидат технических наук, докторант кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника» СГУВТ.

ЗУБАНОВ Дмитрий Александрович, ассистент кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ СГУВТ.

РУППЕЛЬ Александр Александрович, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ СГУВТ.

Адрес для переписки: elektrotex@mail.ru

Статья поступила в редакцию 04.03.2015 г.

© А. И. Антонов, Ю. М. Денчик, Д. А. Зубанов, А. А. Руппель

ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЖЕКТОРА

Работа посвящена описанию принципа работы эжектора классической схемы. Приводится обоснование энергообмена между газовыми потоками в эжекторе за счет сил вязкости. Показана нецелесообразность описания принципа работы эжектора с точки зрения идеальной жидкости.

Ключевые слова: эжектор, газовые потоки, энергообмен, силы вязкости.

Современное состояние вопроса расчетов струйных аппаратов, а в частности эжекторов, обходится без математического описания процесса энергетического обмена между газовыми потоками, основанного на силах вязкости. Это приводит к большим затратам на проведение экспериментов при определении оптимальных геометрических параметров эжектора (рис. 1).

На основании вышеизложенного основной задачей данной работы является приведение обоснования энергообмена между газовыми потоками в эжекторе за счет сил вязкости.

Объектом исследования эжектор стал благодаря одновременно и узкой, и широкой области применения, так как решает задачи локального характера, но применяется во многих отраслях, таких как энергетическая, авиационная и химическая промышленности, сельское хозяйство и так далее. По существу, эжектором можно назвать любое устройство, принцип работы которого заключается в том, что полное давление одного (эжектируемого) потока увеличивается за счёт смешения его с другим (эжектирующим) потоком, имеющим более высокое полное давление.

На рассмотрение возьмем эжектор классической схемы, так как он характеризуется наличием большого количества экспериментальных данных, возможностью легкого регулирования параметров, путем изменения положения эжектирующего сопла относительно входа камеры смешения или изменения давления эжектирующего воздуха. Выбранный эжектор прост по конструкции, надежен в работе, не требует высококвалифицированного обслуживающего персонала, имеет малый срок окупаемости, монтируется на открытой площадке, работает в широком диапазоне изменения параметров газа, легко переходит с одного режима работы на другой. Кроме того, газовый эжектор может компримировать газообразные среды в широком диапазоне изменения температуры и состава, в том числе взрывоопасные, сероводородсодержащие, с твердыми и жидкими частицами. Основными параметрами эжектора, являющимися показателями эффективности работы, являются коэффициент эжекции, степень сжатия и отношение полных давлений. Основная трудность теоретического определения характеристик эжектора состоит в сложности описания самого процесса турбулентного смешения струй, их взаимодействие в пространстве, ограниченном жесткими стенками так называемой «камеры смешения».

Рассмотрим один из примеров классического описания принципа работы эжектора.

Как правило, в струйных аппаратах происходит сначала преобразование потенциальной энергии

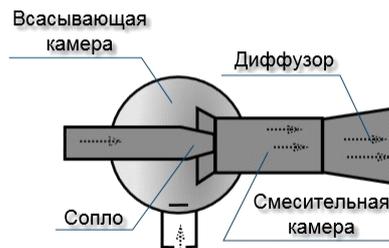


Рис. 1. Принципиальная схема эжектора

и теплоты в кинетическую энергию. В процессе движения через проточную часть струйного аппарата происходит выравнивание скоростей смешиваемых потоков, а затем обратное преобразование кинетической энергии смешанного потока в потенциальную энергию или теплоту. Обычно давление смешанного потока на выходе из струйного аппарата выше давления инжектируемого потока перед аппаратом, но ниже давления рабочего потока. Хотя иногда в пароводяных инжекторах давление смешанного потока может превышать давление рабочего потока. Потоки рабочей и инжектируемых сред поступают в камеру смешения, где происходит выравнивание скоростей, сопровождающееся, как правило, повышением давления. Из камеры смешения поток поступает в диффузор, где происходит дальнейший рост давления. Давление смешанного потока на выходе из диффузора выше давления инжектируемого потока, поступающего в приемную камеру [1, с. 4].

Расчет, основанный на вышеизложенном описании, струйного эжектора производят в следующей последовательности [1, с. 16].

Определяют критические скорости рабочего и инжектируемого потоков по формуле:

$$a = \sqrt{\frac{2k}{k+1}RT_0} = \sqrt{\frac{2k}{k+1}P_0V_0} = \sqrt{\frac{2k}{k+1}\frac{P_0}{\rho_0}};$$

где P_0 — давление потока торможения, Па;
 V_0 — удельный объем потока торможения, м³/кг;
 ρ_0 — плотность потока торможения, кг/м³.

Рассчитывают относительную температуру потоков и относительное давление по формулам:

$$\tau = \frac{T}{T_0} = 1 - \frac{k-1}{k+1}\lambda^2, \quad \Pi = \frac{P}{P_0} = \left[1 - \frac{k-1}{k+1}\lambda^2\right]^{k/(k-1)}.$$

По найденному значению относительного давления определяют газодинамические функции — приведенную скорость потоков λ и приведенное попе-

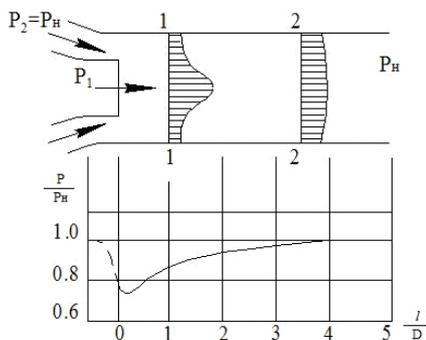


Рис. 2. Изменение статического давления по длине камеры смешения

речное сечение потоков q . Проводят проверку области значений приведенного поперечного сечения потоков, в которой работа эжектора невозможна. При этом $\lambda_\varepsilon \leq \lambda_{\max}$, где λ_ε — приведенная скорость потока при заданной относительной плотности ε , λ_{\max} — приведенная скорость потока при истечении потока в абсолютный вакуум.

Рассчитывают методом последовательного приближения достижимое значение коэффициента эжекции.

Определяют методом последовательного приближения достижимое давление сжатия P_c или достижимую степень повышения давления P_c/P_H . Рассчитывают геометрические размеры струйного аппарата.

Как видно, наличие в расчетах методов последовательного приближения подразумевает последующую доводку аппарата в ходе испытаний и экспериментов и несовершенство описания принципа работы эжектора.

В связи с этим рассмотрим рабочий процесс эжектора относительно влияния вязкости на процесс энергообмена.

Высоконапорный (эжектирующий) газ, имеющий полное давление P^*_1 , вытекает из сопла в смешительную камеру. При стационарном режиме работы эжектора во входном сечении смешительной камеры устанавливается статическое давление P_2 , которое всегда ниже полного давления низконапорного (эжектируемого) газа P^*_2 . Далее, по тракту, статические давления потоков газов будут выравниваться между собой в результате смешения (рис. 2).

Пусть частицы газа после прохождения входного сопла эжектора движутся вдоль камеры смешения. Каждая частица газа будет иметь три составляющие абсолютной скорости V : осевую V_z , радиальную V_r и окружную V_φ [2]. Так как движение газа имеет только линейный (вдоль оси) характер, радиальная и окружная составляющие абсолютной скорости исключаются из рассмотрения. Таким образом, для обоснования энергообмена в эжекторе производится исследование влияния изменения осевой скорости по ее радиусу и длине. Движение жидкости считается стационарным, а внешние силы отсутствующими.

Составляем уравнение движения вязкой жидкости в цилиндрических координатах [3, с. 395]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \varphi} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = \\ = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \end{aligned}$$

$$+ \nu \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \varphi} \right).$$

В ходе несложных преобразований получаем окончательное выражение скорости:

$$V = -\frac{1}{4\mu} \frac{\partial p}{\partial z} (r_1^2 - r^2) \quad [2, \text{с. 430}].$$

Далее, описывая составляющие тензора напряжений в цилиндрических координатах, получаем [3, с. 395]:

$$p_{rr} = -p + 2\mu \frac{\partial V_r}{\partial r},$$

$$p_{\varphi\varphi} = -p + 2\mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{V_r}{r} \right),$$

$$p_{zz} = -p + 2\mu \frac{\partial V_z}{\partial z},$$

$$p_{r\varphi} = \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \frac{V_\varphi}{r} \right),$$

$$p_{\varphi z} = \mu \left(\frac{\partial V_\varphi}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \varphi} \right),$$

$$p_{rz} = \mu \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right).$$

Затем мы рассматриваем часть цилиндра, вдоль которого движутся внешние слои осевого потока газа, а также часть цилиндра, вдоль которого движутся внутренние слои периферийного потока газа. Элементы этих частей поверхностей действует сила трения $P_{zz} r_1 l_i \partial \varphi$. Анализ показывает, что силы трения прямо пропорциональны вязкости газа, так как

$$P_{zz} = -p + 2\mu \frac{\partial V_z}{\partial z}.$$

А также результатом взаимодействия периферийного и осевого потоков в эжекторе является работа, которая прямо пропорциональна силам трения и вязкости газа.

Следовательно, если описывать принцип работы эжектора с точки зрения идеальной жидкости, то в этом случае вязкость газа равна нулю, соответственно, силы трения равны нулю и передаваемая энергия равна нулю, эффективность эжектора, соответственно, также будет равна нулю.

Библиографический список

1. Софронов, В. Л. Расчет струйных аппаратов : учеб. пособие / В. Л. Софронов, И. Ю. Русаков, Т. В. Ощепкова. — Северск : СТИ НИЯУ МИФИ, 2011. — 33 с.
2. Кузнецов, В. И. Теория и расчет эффекта Ранка : науч. изд. / В. И. Кузнецов. — Омск : ОмГУ, 1994. — 217 с.
3. Кочин, Н. Е. Теоретическая гидромеханика. В 2 ч. Ч. II / Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розе. — М. : Физматгиз, 1963. — 728 с.

ЛУПОВ Никита Сергеевич, аспирант кафедры авиационного ракетостроения.

Адрес для переписки: nikitalupov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23.03.2015 г.

© Н. С. Лупов

РАСЧЕТ РЕСУРСОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ РЕСПУБЛИКИ ТЫВА

В данной статье предлагается метод расчета ресурсов солнечной энергии и приводятся результаты расчета ресурсов солнечной энергии для Республики Тыва, используя метеоданные за 22 года.

Ключевые слова: солнечная энергия, валовый потенциал солнечной энергии, технический потенциал солнечной энергии, экономический потенциал солнечной энергии.

В последние годы животноводческих хозяйств становятся все больше и большинство из них не электрифицированы, особенно летние стойбища. Установка трансформаторных подстанций очень дорога, плюс еще протяжка линий электропередач на несколько километров. Для получения электричества люди используют дизель- или бензо-генераторы. Все это хорошо, но есть простой способ «бесплатно» получить тепловую и электрическую энергию без всяких дорогостоящих подстанций и генераторов — это энергия Солнца. Фотозлектрический преобразователь — электричество, солнечный коллектор — тепло и горячее водоснабжение. Используя энергию Солнца, мы не только сохраняем природные ресурсы, но и заботимся об окружающей среде.

Чтобы использовать грамотно и с наибольшей выгодой солнечную энергию, для начала надо определить ресурсы этой энергии. В данной статье приведены результаты расчета по определению ресурсов солнечной энергии (СЭ) для Улуг-Хемского района (Республика Тыва) площадью 5335,4 км².

Все метеоданные (среднегодовые данные за 22 года) для определения ресурсов были взяты из [1].

1. Валовый потенциал СЭ. Валовый (теоретический) потенциал солнечной энергии региона — это среднегодовая суммарная энергия солнечного излучения, падающая на площадь региона в течение одного года, $W_{\text{в}}$, кВт·ч/год.

Среднегодовой приход солнечной энергии на единицу площади в год (табл. 1):

$$E = 1308,81, \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год}).$$

Валовый потенциал солнечной энергии:

$$W_{\text{в}} = E \cdot S = 1308,81 \cdot S = 1308,81 \cdot 5335,4 \cdot 10^6 = \\ = 6983,025 \cdot 10^9 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{год}.$$

2. Технический потенциал СЭ. Технический потенциал солнечной энергии региона — это средне-

мнолетняя суммарная энергия, которая может быть получена в регионе от солнечного излучения в течение одного года при современном уровне развития науки и техники и соблюдении экологических норм.

Технический потенциал солнечной энергии представляет две самостоятельные части: *технический потенциал тепловой энергии и технический потенциал электрической энергии*, получаемых соответствующим преобразованием солнечного излучения.

$W_{\text{тп}}$, кВт·ч/год — технический потенциал тепловой энергии от солнечного излучения;

$W_{\text{тф}}$, кВт·ч/год — технический потенциал электроэнергии от солнечного излучения;

S_c , м² — площадь, которая по хозяйственным, техническим и экологическим соображениям представляется целесообразной для использования энергии солнечного излучения; она равна части q общей площади S , остающейся после вычитания площадей лесов, парков, сельскохозяйственных угодий, промышленных и водохозяйственных территорий, жилых медицинских и культурных строений, с учетом возможности расположения панелей фотобатарей и солнечных коллекторов на крышах зданий и сооружений, а также с учетом возможности передачи электрической или тепловой энергии:

$$S_c = q \cdot S.$$

В свою очередь, S_c разделяется на две части:

k_t — доля площади S_c , целесообразная для установки солнечных тепловых коллекторов;

$k_{\text{ф}}$ — доля площади S_c , целесообразная для установки солнечных фотозлектрических батарей:

$$k_t + k_{\text{ф}} = 1.$$

Значения q , k_t и $k_{\text{ф}}$ являются специфическими для каждой зоны. В то же время на основе опыта некоторых промышленно развитых стран можно сделать оценку: $q \leq 0,01$; на основе существующего соотношения между используемой тепловой энер-

Таблица 1
Среднегодовой приход солнечной энергии на единицу горизонтальной поверхности в 1-й месяц года

Широта 51° Долгота 92°	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
E_i , кВт·ч/(м ² ·мес.)	46,05	77,85	129,94	148,11	166,95	160,51	167,39	144,58	113,52	77,94	42,4	33,57
Итого за год	$E = 1308,81, \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$											

Таблица 2

Среднемесячные температуры в светлое время суток [1]

Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
-20,1	-18,0	-11,8	-1,18	8,26	13,3	15,1	12,8	6,06	-1,38	-11,6	-17,9

Таблица 3

Продолжительность солнечного сияния $t_{с\lambda}$ и рабочего времени $t_{р\lambda}$; удельные месячные потенциалы тепловой энергии $W_{т\lambda}/S_{\tau}$ за 10 часов в сутки

Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$t_{с\lambda}$, ч/мес.			356	401	467,4	461,2	462	403	345			
$t_{р\lambda}$, ч/мес.			309	295	303	281	289	280	280			
$W_{т\lambda}/S_{\tau}$ кВт/(м ² ·мес.)			50,47	66,21	83,96	85,19	94,51	78,13	51,99			

Таблица 4

Среднемесячные значения рабочей температуры фотопреобразователей T_i и удельные месячные технические потенциалы электрической энергии $W_{т\lambda}/S_{\phi}$

Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
T_i , К	253	255	261	272	281	285	288	286	279	272	262	255
$W_{т\lambda}/S_{\phi}$ кВт·ч/(м ² ·мес.)	7,06	11,86	19,39	21,26	23,18	21,95	22,63	19,7	15,88	11,19	6,31	5,11

Таблица 5

Месячный приход солнечной энергии $E_{н\lambda}$ и удельный объем выработки энергии тепловым коллектором $V_{т\lambda}$ на поверхности, наклоненной под углом $\beta=\varphi-\delta$

Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$E_{н\lambda}$ кВт·ч/(м ² ·мес.)	50,5	86,4	281,3	209,7	226,6	203,4	206,5	183,8	127,1	87,5	49,8	36,5
$V_{т\lambda}$ кВт·ч/(м ² ·мес.)	-	-	141,93	98,755	125,16	115,62	120,825	99,62	38,79	-	-	-

гий и электроэнергией в большинстве регионов России можно указать примерное соотношение: $k_{\tau} \approx 0,9$; $k_{\phi} \approx 0,1$ [2].

2.1. *Технический потенциал тепловой энергии от солнечного излучения.* При определении приняты следующие значения $T = 60^{\circ}\text{C}$ — температура горячей воды, $F(\tau\alpha) = 0,9$, $FU_L = 0,005$ кВт/(м²·К).

Удельный месячный потенциал тепловой энергии, кВт/(м²·мес.):

$$W_{т\lambda}/S_{\tau} = E_i F \left[(\tau\alpha) - U_L (T - T_{oi}) \cos(\varphi - \delta) \cdot \frac{t_{р\lambda}}{E_i} \right],$$

где $(\varphi - \delta)$ — угол наклона коллектора к Земле; T_{oi} — среднемесячная температура окружающей среды в дневное время (во время работы установок).

Используя значения E_i из табл. 1 и T_{oi} из табл. 2 приведены рассчитанные значения $W_{т\lambda}/S_{\tau}$ в табл. 3.

В осенне-зимние месяцы (октябрь — февраль) использование коллекторов с представленными техническими параметрами для получения горячей воды с $T_r = 60^{\circ}\text{C}$ невозможно, т.е., соответственно, $W_{т\lambda}$ равны нулю.

$$W_{т\lambda}/S_{\tau} = \sum W_{т\lambda}/S_{\tau} = 510,47 \text{ кВт·ч/(м}^2\text{·год)}.$$

Итак, технический потенциал тепловой энергии от солнечного излучения равен:

$$W_{т\lambda} = 510,47 \cdot q \cdot k_{\tau} \cdot S = 510,47 \cdot 0,01 \cdot 0,9 \cdot 5335,4 \cdot 10^6 = 24512,05 \cdot 10^6 \text{ кВт·ч/год}.$$

2.2. *Технический потенциал электроэнергии от солнечного излучения.* При определении техниче-

ского потенциала электроэнергии были приняты следующие значения [2]:

$q = 0,01$ — доля общей площади, предназначенная для превращения солнечной энергии в тепловую и электрическую энергию;

$k_{\phi} = 0,1$ — доля площади qS_c , целесообразная для установки фотоэлектрических батарей.

Технические параметры фотоэлектрических солнечных батарей:

$\eta_1 = 0,13$ КПД в стандартных условиях;

$\chi = 0,004 \text{ K}^{-1}$ — температурный градиент КПД;

$\alpha = 0,97$ — интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения фотопреобразователями; $\langle \lambda \rangle = 40 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}$;

Удельные месячные технические потенциалы электрической энергии $W_{т\lambda}/S_{\phi}$ приведены в табл. 4.

$$W_{т\lambda}/S_{\phi} = \sum W_{т\lambda}/S_{\phi} = 185,52 \text{ кВт·ч/(м}^2\text{·год)}.$$

Технический потенциал электроэнергии равен:

$$W_{т\lambda} = 185,52 \cdot q \cdot k_{\phi} \cdot S = 185,52 \cdot 0,01 \cdot 0,1 \cdot 5335,4 \cdot 10^6 = 990 \cdot 10^6 \text{ кВт·ч/год}.$$

3. *Экономический потенциал СЭ.* Экономический потенциал солнечной энергии региона — это величина годовой выработки тепловой и электрической энергии в регионе от солнечного излучения, получение которой экономически оправданно для региона при существующем уровне цен на оборудование, строительство установок, энергию и топливо с учетом его транспортировки и соблюдения экологических норм.

Экономический потенциал солнечной энергии представляет две самостоятельные части: экономический потенциал тепловой энергии и экономический потенциал электрической энергии, получаемых соответствующим преобразованием солнечного излучения.

3.1. Экономический потенциал тепловой энергии от солнечного излучения. Определение экономического потенциала проводился при условии, что солнечные тепловые коллекторы стационарно ориентированы под углом $\beta = 37^\circ$ наклона к горизонту, $T_r = 60^\circ\text{C}$, $T_x = 15^\circ\text{C}$, $F(\tau\alpha) = 0,9$, $FU_L = 0,005 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, стоимость установки с учетом экологического фактора $r_3 C = 400 \text{ долл.}/\text{м}^2$ [2].

Месячный приход солнечной энергии $E_{\text{н}}$ и удельный объем выработки энергии тепловым коллектором $V_{\text{т}}$ на поверхности, наклоненной под углом $\beta = \varphi - \delta$, рассчитаны и приведены в табл. 5.

В осенне-зимние месяцы (октябрь – февраль) использование коллекторов с представленными техническими параметрами для получения горячей воды с $T_r = 60^\circ\text{C}$ невозможно.

Суммированием по всем месяцам определено (из табл. 5):

$$E_{\text{н}} = 1749,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год}),$$

$$V_{\text{т}} = 740,7 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год}).$$

Экономический потенциал тепловой энергии при различных сроках службы солнечных тепловых коллекторов рассчитаны и приведены в табл. 6 и 7.

Проведенные расчеты показали, что для $\gamma = 0,05/\text{год}$ окупаемости установок нет, а для $\gamma = 0$ время окупаемости очень большое: 111 лет. Это означает, что отличие экономического потенциала от нуля обусловлено только существованием дефицита тепловой энергии. Поскольку $W_{\text{т}} = 510,47 \cdot S_{\text{т}}$ кВт·ч/год, где $S_{\text{т}}$, м^2 – площадь, отводимая под установку тепловых коллекторов, то для реализации представленных в табл. 6 и 7. значений экономического потенциала достаточно отведения площадей в диапазоне $3,99 \cdot 10^3 \text{ м}^2 < S_{\text{т}} < 2,87 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ в зависимости от срока службы установок.

3.2. Экономический потенциал электрической энергии от солнечного излучения. При определении экономического потенциала электрической энергии были приняты следующие данные:

– значения параметров солнечных батарей:

$$\alpha = 0,97; \eta_1 = 0,13; \chi = 0,004 \text{ К}^{-1}; T_1 = 298 \text{ К}; \langle \lambda \rangle = 40 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К});$$

– стоимость установки с учетом экологического фактора:

$$r_3 C = 1000 \text{ долл.}/\text{м}^2$$
 [2].

Месячный приход солнечной энергии $E_{\text{н}}$ и удельный объем выработки энергии фотопреобразователя $V_{\text{т}}$ на поверхности, наклоненной под углом $\beta = \varphi - \delta$, приведены в табл. 8.

Суммированием по всем месяцам:

$$E_{\text{н}} = 1749,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год}),$$

$$V_{\text{ф}} = 248,54 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год}).$$

Экономический потенциал при различных сроках службы солнечных фотоэлектрических установок приведены в табл. 9 и 10.

Проведенные расчеты показывают, что для $\gamma = 0,02/\text{год}$ окупаемости установок нет, а для $\gamma = 0$ время окупаемости 68 лет. Это означает, что отличие экономического потенциала от нуля обусловлено только существованием дефицита электроэнергии. Поскольку $W_{\text{тф}} = 185,52 S_{\text{ф}}$ кВт·ч/год, где $S_{\text{ф}}$, м^2 – пло-

щадь, отводимая под установку фотоэлектрических установок, то для реализации представленных в табл. 9 и 10 значений экономического потенциала достаточно отведения площадей в диапазоне $4,3 \cdot 10^3 \text{ м}^2 < S_{\text{ф}} < 15,8 \cdot 10^3 \text{ м}^2$ в зависимости от срока службы установок.

Сравнением значений экономического потенциала по представленным двум вариантам выбирается наибольшее значение, которое принимается как экономический потенциал электроэнергии от солнечного излучения. Экономический потенциал солнечной энергии получаем в виде двух величин:

$$W_{\text{эт}} = 14641,74 \text{ тыс. кВт}\cdot\text{ч}/\text{год},$$

$$W_{\text{эф}} = 2928,42 \text{ тыс. кВт}\cdot\text{ч}/\text{год}.$$

Таблица 6

Критические значения удельной энергии солнечного теплового коллектора $V_{\text{кр}}$ и величины экономического потенциала тепловой энергии $W_{\text{эт}}$ при различных сроках службы коллекторов $T_{\text{сж}}$ $\gamma = 0,05/\text{год}$; $T_{\text{ок}}$ — нет (срок окупаемости); $T_{32} = 3,94$

$T_{\text{сж}}$, ГОД	$V_{\text{кр}}$, кВт·ч/(м^2 ·год)	$W_{\text{эт}}$, тыс. кВт·ч/год
3,94	24875,48	2034,33
4	24563,76	2060,95
5	20469,8	2488,62
6	17740,49	2888,16
7	15790,99	3262,27
8	14328,86	3613,3
9	13191,65	3943,33
10	12281,88	4254,17
12	10917,23	4824,65
14	9942,47	5335,73
16	9211,41	5796,23
18	8642,8	6213,3
20	8187,92	6592,82
∞	4094	14641,74

Таблица 7

Критические значения удельной энергии солнечного теплового коллектора $V_{\text{кр}}$ и величины экономического потенциала тепловой энергии $W_{\text{эт}}$ при различных сроках службы коллекторов $T_{\text{сж}}$ $\gamma = 0$; $T_{\text{ок}} = 111$ лет; $T_{32} = 3,3$

$T_{\text{сж}}$, ГОД	$V_{\text{кр}}$, кВт·ч/(м^2 ·год)	$W_{\text{эт}}$, тыс. кВт·ч/год
3,3	24811,88	2031,05
4	20469,8	2477,99
5	16375,84	3126,71
6	13646,53	3787,78
7	11697,03	4461,57
8	10234,9	5148,44
9	9097,69	5848,78
10	8187,92	6562,98
12	6823,27	8034,68
14	5848,51	9567,07
16	5117,45	11163,98
18	4548,84	12829,58
20	4093,96	14568,38

Месячный приход солнечной энергии $E_{\text{ш}}$
и удельный объем выработки энергии фотопреобразователя $V_{\text{т}}$ на поверхности,
наклоненной под углом $\beta = \varphi - \delta$

Параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$E_{\text{ш}}$, кВт·ч/(м ² ·мес.)	50,5	86,4	281,3	209,7	226,6	203,4	206,5	183,8	127,1	87,5	49,8	36,5
$V_{\text{т}}$, кВт·ч/(м ² ·мес.)	7,75	13,16	41,98	30,1	31,46	27,82	27,92	25,04	17,78	12,56	7,41	5,56

Таблица 9

Критические значения удельной энергии солнечной батареи $V_{\text{кр}}$
и величина экономического потенциала электрической энергии $W_{\text{эф}}$
при различных значениях срока службы батареи $T_{\text{сл}}$; $\gamma = 0,02/\text{год}$; $T_{\text{ок}}$ — нет; $T_{\text{зг}} = 15$

$T_{\text{сл}}$, ГОД	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
$V_{\text{кр}}$, кВт·ч/(м ² ·год)	2033,3	1750,93	1549,21	1397,92	1280,25	1186,11	1109,09	1044,91	990,6	944,05	903,7
$W_{\text{эф}}$, тыс. кВт·ч/год	0	0	0	805,8	897,7	987,84	1076,25	1162,99	1248,11	1331,64	1413,66

Таблица 10

Критические значения удельной энергии солнечной батареи $V_{\text{кр}}$
и величина экономического потенциала электрической энергии $W_{\text{эф}}$
при различных значениях срока службы батареи $T_{\text{сл}}$; $\gamma = 0/\text{год}$; $T_{\text{ок}} = 68$ лет; $T_{\text{зг}} = 12,3$

$T_{\text{сл}}$, ГОД	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
$V_{\text{кр}}$, кВт·ч/(м ² ·год)	1694	1412	1210	1059	941,36	847,22	770,2	706,0	651,71	605,16	564,81
$W_{\text{эф}}$, тыс. кВт·ч/год	0	0	962,9	1143	1336,8	1547,0	1775,4	2024,0	2297,2	2597,0	2928,4

Таким образом перед нами открываются большие возможности для использования солнечной энергии. Суммарная солнечная радиация в нашем случае 1309 кВт·ч/м² — почти такая же, как в г. Сочи, — 1400 кВт·ч/м² [3]. Но какие бы расчеты и открытия ни совершались, население не будет использовать это. Надо на государственном уровне проводить пропаганду среди населения выгоды использования солнечной энергии. Публиковать хотя бы простейшие проекты в самых читаемых газетах, например, солнечного дома, чтобы люди при строительстве жилья начали учитывать возможности использования солнечной энергии. Меньше угля будем сжигать, сократится вырубка лесов. Используя энергию Солнца, мы не только себе делаем хорошо, но и всей окружающей среде.

Библиографический список

1. Сайт Tuva-meteo. — Режим доступа : www.tuva-meteo.ru (дата обращения: 23.05.2013).
2. Безруких, П. П. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии / П. П. Безруких, Д. С. Стребков. — М.: ГНУ ВИЭСХ, 2005. — 264 с.
3. Электронная библиотека по энергетике [Электронный ресурс]. — Режим обращения : <http://lib.rosenergосervis.ru/2011-07-20-04-56-55.html?start=2> (дата обращения: 01.02.2015).

ОНДАР Демир-оол Дмитриевич, аспирант кафедры «Теплоэнергетика».

Адрес для переписки: ondardd@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.02.2015 г.

© А. Д. Ондар

Книжная полка

Кузнецов, Е. М. Силовая электроника. Мощные полупроводниковые приборы. Вентильные преобразователи электроэнергии : учеб. пособие для вузов по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника», модуль «Электротехника»/ Е. М. Кузнецов, О. А. Лысенко. — Омск : ОмГТУ, 2015. — 106 с.

Приведены описания, параметры и характеристики мощных ключевых полупроводниковых приборов и режимы работы силовых ключей. Рассмотрены преобразователи переменного напряжения в постоянное и их схемная реализация. Представлены виртуальные лабораторные работы, охватывающие основные разделы дисциплины «Силовая электроника». Лабораторные работы подготовлены в системе схемотехнического проектирования Multisim. Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника».

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДОГРЕВА ВОЗДУХА, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ ГОРЕНИЯ ДОЖИГАЮЩЕГО ТОПЛИВА В МУСОРОСЖИГАТЕЛЬНЫХ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТАХ

Предложен алгоритм определения оптимальной температуры подогрева воздуха, идущего для горения дожигающего топлива в мусоросжигательных котельных агрегатах, исходя из минимума суммарных дисконтированных затрат на воздухоподогреватель и дожигающее топливо. Обоснована целесообразность применения разработанного алгоритма, позволяющего снизить удельный расход дожигающего топлива, повысить коэффициент полезного действия мусоросжигательных агрегатов.

Ключевые слова: эффективность, затраты, тепловая энергия, теплопередача, дожигающее топливо, котлоагрегат.

Федеральный закон РФ № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...» от 23 ноября 2009 года предусматривает, в том числе, использование твердых бытовых отходов (ТБО) для производства тепловой и электрической энергии [1–4].

Однако показатель энергетической эффективности процессов отечественных комплексов мусоросжигательных заводов в настоящее время невысокий (60–65 %), коэффициент полезного действия агрегатов составляет 70–75 % [1]. Это обусловлено низким уровнем использования теплоты отходящих газов и затратами на дожигающее топливо.

Дожигающее топливо в мусоросжигательных агрегатах применяется для повышения температуры горения с целью экологически безопасной утилизации твердых бытовых отходов. Затраты данного вида топлива в энергетическом балансе агрегатов составляют 20–40 % [2].

Эффективность утилизации ТБО термическим способом, обоснована и принята целесообразной как отечественными, так и зарубежными научно-исследовательскими организациями и промышленными предприятиями [3].

Состав и калорийность бытовых отходов сопоставимы с низкосортными углями. Элементарный состав и низшая теплота сгорания твердых топлив и ТБО г. Омска представлены в табл. 1 [4].

Экономичность использования дожигающего топлива в мусоросжигательных котельных агрегатах повышается при сочетании мероприятий по обеспечению полного его сгорания при минимальном избытке воздуха с утилизацией теплоты уходящих газов. Высокотемпературный подогрев воздуха в воздухоподогревателе — одно из основных мероприятий по повышению тепловой эффективности котельных

агрегатов, позволяющее повысить КПД, снизить удельный расход дожигающего топлива (рис. 1). Однако это ведет к увеличению затрат на теплоутилизующие устройства, поэтому целесообразно получить оптимальную температуру подогрева воздуха, идущего для горения дожигающего топлива в мусоросжигательном котлоагрегате.

Сравнительная эффективность инноваций, согласно положениям методики экономической эффективности капитальных вложений, является основной количественной оценкой при выборе оптимального варианта. Приведенные издержки представляют собой сумму себестоимости и нормативной прибыли [5], руб.:

$$И = S + a \cdot K, \quad (1)$$

где K — капитальные вложения, руб.; S — себестоимость единицы продукции, руб., a — коэффициент приведения дисконтирования, определяется из выражения:

$$a = \frac{1}{(1+r)^{-1} + (1+r)^{-2} + \dots + (1+r)^{-n}}, \quad (2)$$

где r — норма дисконта.

Основные эксплуатационные издержки I_T при сжигании дожигающего топлива в мусоросжигательных агрегатах, применяемых для получения тепловой энергии, включают: подачу дутьевого воздуха для горения ТБО и дожигающего топлива, подачу отходов и природного газа. Соответственно выражению (1) примет вид, руб.:

$$I_T = (S_T + S_{ам} + S_B) + a \cdot K, \quad (3)$$

где S_T — годовые затраты на дожигающее топливо,

Элементарный состав и низшая теплота сгорания на рабочую массу некоторых низкокалорийных твердых топлив г. Омска

Вид топлива	Элементарный состав, %							Низшая теплота сгорания, МДж/кг
	C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	A ^p	W ^p	
Торф	24,7	2,6	15,2	1,1	0,1	6,3	50	8,11
Дрова	30,3	3,6	25,1	0,4	—	0,6	40	10,2
Сортированные ТБО	18,74	2,31	14,30	0,70	0,10	10,74	55,38	5,60
Несортированные ТБО	15,97	1,95	12,13	0,6	0,08	22,26	47	4,94

Элементарный состав ТБО для г. Омска рассчитан из морфологического состава [4].

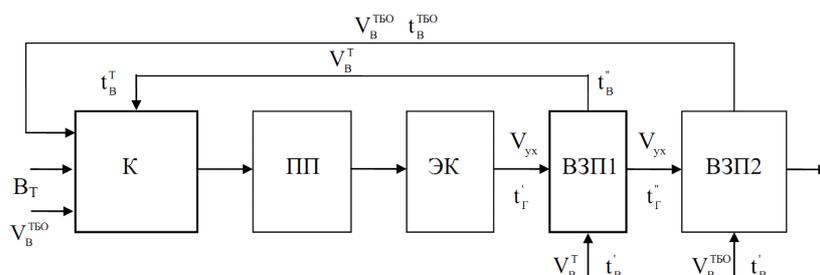


Рис. 1. Схема материальных потоков котлоагрегата для сжигания твердых бытовых отходов и дожигающего топлива

руб.; $S_{ам}$ — годовые отчисления на амортизацию, руб.; S_B — годовые затраты на подачу дутьевого воздуха для горения дожигающего топлива, руб.

$$S_T = C_T \cdot B_T, \tag{4}$$

где C_T — удельная годовая стоимость дожигающего топлива, руб.·с/м³; B_T — расход дожигающего топлива, м³/с.

$$C_T = P_r \cdot \tau, \tag{5}$$

где P_r — полная расчетная стоимость 1 м³ дожигающего топлива (природного газа), р./м³; τ — время работы воздухоподогревателя в течение года, с;

$$S_{ам} = П \cdot K, \tag{6}$$

где $П$ — норма амортизационных отчислений в год.

$$K_p = P_p \cdot H + C_{т.д.} \cdot Z \cdot \Delta N_{т.д.} \cdot H, \tag{7}$$

где P_p — капиталовложения в сооружение 1 м² поверхности нагрева воздухоподогревателя, руб./м²; $C_{т.д.}$ — стоимость тягодутьевых машин, руб./Вт; Z — коэффициент запаса, включающий резерв по расходу и давлению тягодутьевых машин и мощности электродвигателя; $\Delta N_{т.д.}$ — мощность, затрачиваемая на обслуживание 1 м² поверхности нагрева воздухоподогревателя (на преодоление воздушного сопротивления), Вт/м²; H — поверхность нагрева воздухоподогревателя, определяется по выражению [6], м²:

$$H = \frac{B_T \cdot \eta_B \cdot V_B^T \cdot (C_B'' \cdot t_B'' - C_B' \cdot t_B')}{k \cdot \varepsilon_{\Delta t} \cdot \vartheta}, \tag{8}$$

где η_B — коэффициент, учитывающий потери воздуха в воздухоподогревателе; V_B^T — количество воздуха, необходимое для сжигания единицы количества дожигающего топлива, м³/м³; C_B', t_B' — средняя объемная теплоемкость и температура воздуха на входе в воздухоподогреватель, Дж/(м³·К); °С; k — коэффи-

циент теплопередачи, Вт/(м²·К); $\varepsilon_{\Delta t}$ — поправочный коэффициент при сложной схеме теплообмена; ϑ — средний температурный напор, °С.

$$S_B = C_3 \cdot \tau \cdot \Delta N_{т.д.} \cdot H, \tag{9}$$

где C_3 — стоимость электроэнергии, руб./Втс).

Величины отчислений на реновацию, капитальный и текущий ремонт принимаются пропорционально капитальным вложениям.

Подставим в (3) выражения (4) — (7), получим выражение для величины суммарных дисконтированных издержек на воздухоподогреватель и расход дожигающего топлива в мусоросжигательном котлоагрегате:

$$I_T = C_T \cdot B_T + C_p \cdot H, \tag{10}$$

$$C_p = P_p \cdot (P_n + П) + \Delta N_{т.д.} \cdot [Z \cdot C_{т.д.} \cdot (a + П) + C_3 \cdot \tau], \tag{11}$$

где C_p — годовая стоимость 1 м² поверхности нагрева воздухоподогревателя, руб./м².

Значение оптимальной температуры подогрева воздуха для конкретной температуры уходящих газов можно найти, исходя из минимума суммарных дисконтированных издержек на воздухоподогреватель и дожигающее топливо I_T (10), при приравнении к нулю частных производных функции по оптимизируемому параметру:

$$\frac{\partial I_T}{\partial t_B''} = 0, \tag{12}$$

$$C_T \cdot \frac{\partial B_T}{\partial t_B''} + C_p \cdot \frac{\partial H}{\partial t_B''} = 0. \tag{13}$$

Выражение по расходу дожигающего топлива в мусоросжигательном агрегате, применяемого для получения пара, получим из уравнений теплового и материального балансов котла [7; 8]:

$$Q_x + Q_B + Q_T = Q_H + Q_{yx} + Q_{x.н.} + Q_{м.н.} + Q_{охл} + Q_{шл}, \tag{14}$$

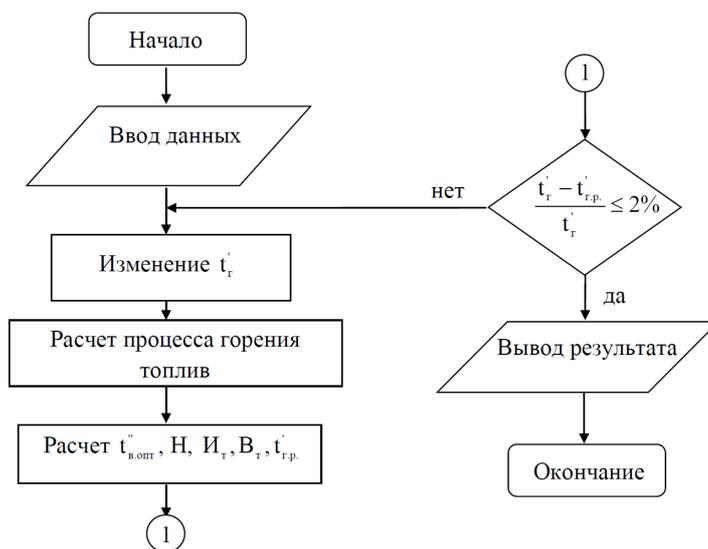


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения оптимальной температуры подогрева воздуха для горения дожигающего топлива

где Q_x — химическая теплота сжигаемых топлив, Вт; Q_b — теплота, вносимая подогретым воздухом, Вт; Q_t — тепло, вносимое с топливами, Вт; Q_n — тепло, полученное в котлоагрегате, Вт; Q_{yx} — потери теплоты с уходящими продуктами сгорания топлив, Вт; $Q_{x.n.}$ — потери теплоты от химической неполноты сгорания топлив, Вт; $Q_{м.н.}$ — потери теплоты от механической неполноты сгорания топлив, Вт; $Q_{охл.}$ — потери теплоты от наружного охлаждения, Вт; $Q_{шл.}$ — потери тепла со шлаком, Вт.

$$Q_x = V_{тбо} \cdot Q_{н.тбо}^p + V_t \cdot Q_{н.т}^p, \quad (15)$$

где $V_{тбо}$ — расход твердых бытовых отходов (ТБО), кг/с; $Q_{н.тбо}^p$ — низшая теплота сгорания ТБО, Дж/кг; $Q_{н.т}^p$ — низшая теплота сгорания дожигающего топлива, Дж/м³.

$$Q_b = V_{тбо} \cdot C_b^{тбо} \cdot t_b^{тбо} \cdot V_b^{тбо} + V_t \cdot C_t^t \cdot t_t^t \cdot V_b^t, \quad (16)$$

где $C_b^{тбо}$, $t_b^{тбо}$ — средняя объемная теплоемкость и температура подогретого воздуха, необходимого для сжигания ТБО, Дж/(кг·К), °С; $V_b^{тбо}$ — количество воздуха, необходимое для сжигания единицы количества ТБО, м³/кг; C_t^t , t_t^t — средняя объемная теплоемкость и температура подогретого воздуха, необходимого для сжигания дожигающего топлива, Дж/(кг·К), °С.

$$Q_t = V_{тбо} \cdot C'_{т.тбо} \cdot t'_{т.тбо} + V_t \cdot C'_{т.т} \cdot t'_{т.т}, \quad (17)$$

где $C'_{т.тбо}$, $t'_{т.тбо}$ — соответственно средняя объемная теплоемкость и температура твердых бытовых отходов, Дж/(кг·К); °С; $C'_{т.т}$, $t'_{т.т}$ — соответственно средняя объемная теплоемкость и температура дожигающего топлива, Дж/(м³·К); °С.

$$Q_{yx} = (V_{тбо} \cdot V_{yx}^{тбо} + V_t \cdot V_{yx}^t) \cdot C_{yx} \cdot t_{yx}, \quad (18)$$

где $V_{yx}^{тбо}$ — действительный объем продуктов сгорания ТБО, м³/кг; V_{yx}^t — действительный объем продуктов сгорания дожигающего топлива, м³/м³; C_{yx} , t_{yx} — соответственно средняя объемная теплоемкость и температура уходящих газов из котельного агрегата, Дж/(м³·К); °С.

$$Q_{x.n.} = 23600 \cdot \frac{C^p}{100} \cdot \frac{CO}{(CO_2 + CO)} \cdot V_{тбо}, \quad (19)$$

где C^p — содержание углерода в отходах, %; CO — содержание оксида углерода в продуктах сгорания, %; CO_2 — содержание диоксида углерода в продуктах сгорания, %.

$$Q_{м.н.} = \beta \cdot V_{тбо} \cdot Q_{н.тбо}^p, \quad (20)$$

где β — доля потерь от механической неполноты сгорания.

$$Q_{охл.} = \frac{(4 - 0,3 \cdot D + 0,0097 \cdot D^2 - 0,0001 \cdot D^3) \cdot V_{тбо} \cdot Q_{н.тбо}^p}{100}, \quad (21)$$

где D — паропроизводительность котла, кг/ч.

$$Q_{шл.} = \frac{a_{шл} \cdot (ct)_{шл} \cdot A^p \cdot V_{тбо}}{100}, \quad (22)$$

где $a_{шл}$ — доля золы отходов, приходящаяся на шлак; $(ct)_{шл}$ — энтальпия шлака, Дж/кг; A^p — содержание золы в отходах, %.

На основании полученных выражений разработан алгоритм определения оптимальной температуры подогрева воздуха на выходе из воздухоподогревателя для конкретной температуры уходящих газов, выходящих из экономайзера мусоросжигательного котельного агрегата. Блок-схема полученного алгоритма представлена на рис. 2.

Проведенные расчетные исследования показали, что значение оптимальной температуры подогрева воздуха $t''_{в.опт}$ определенное из уравнения (12), отвечает минимуму целевой функции (рис. 3).

Реализация разработанного алгоритма применительно к условиям г. Омска (несортированные ТБО) и параметрам мусоросжигательного котлоагрегата: производительностью 10000 кг/ч, температурой пара 250 °С, давлением пара 1,4 МПа, использующего в качестве дожигающего топлива природный газ с $Q_{н.т}^p = 34,5$ МДж/м³, $\tau = 8760$ ч/год, получили следующие результаты: $t''_{в.опт} = 480$ °С; $I_{т.мин} = 1,168 \cdot 10^7$ руб./год. Удельный расход дожига-

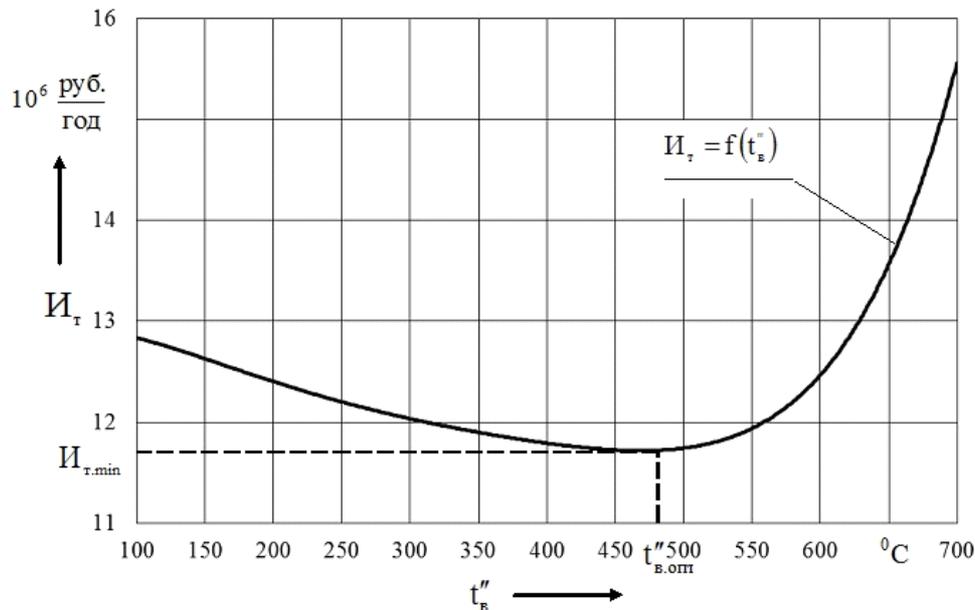


Рис. 3. Зависимость дисконтированных затрат по воздухоподогревателю и дожигаемому топливу от температуры подогрева воздуха

ющего топлива уменьшился на 12 %, коэффициент полезного действия увеличился на 2,6 %. Ожидаемый экономический эффект от внедрения составляет 0,98 млн рублей в год.

Таким образом, полученные результаты подтверждают целесообразность использования предложенных разработок при проектировании и эксплуатации мусоросжигательных котельных агрегатов.

Библиографический список

1. Тугов, А. Н. Исследование процессов и технологий энергетической утилизации бытовых отходов для разработки отечественной ТЭС на ТБО [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. Н. Тугов. — М., 2012. — 349 с.
2. Шубов, Л. Я. Технологии отходов (Технологические процессы в сервисе) [Текст] / Л. Я. Шубов, М. Е. Ставровский, Д. В. Шехирев. — М. : МГУС, 2006. — 410 с.
3. Шерстобитов, М. С. Твердые бытовые отходы: проблемы и пути утилизации [Текст] / М. С. Шерстобитов, В. М. Лебедев // Промышленная энергетика. — 2010. — № 4. — С. 60–64.
4. Колесников, С. Н. О проектах утилизации твердых бытовых отходов в Омске [Текст] / С. Н. Колесников // Вестник ЖКХ Омской области. — 2003. — № 4 (6). — С. 45–50.
5. Методика определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобре-

тений и рационализаторских предложений [от 14 февраля 1977 г. № 48/16/13/3] [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.lawmix.ru/sss/11190> (дата обращения: 20.01.2015).

6. Резанов, Е. М. Повышение эффективности работы термических печей [Текст] / Е. М. Резанов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2010. — № 3 (93). — С. 144–148.

7. Санитарная очистка и уборка населенных мест : справочник / А. Н. Мирный [и др.] ; под ред. А. Н. Мирного. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Стройиздат, 1990. — 413 с.

8. Тепловой расчет котлов (нормативный метод) [Текст] / Г. М. Каган [и др.]. — СПб. : НПО ЦКТИ, 1998. — 260 с.

ШЕРСТОБИТОВ Михаил Сергеевич, преподаватель кафедры «Теплоэнергетика».

РЕЗАНОВ Евгений Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика».

ЛЕБЕДЕВ Виталий Матвеевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Теплоэнергетика».

Адрес для переписки: rezanove1@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.05.2015 г.

© М. С. Шерстобитов, Е. М. Резанов, В. М. Лебедев

Книжная полка

Кудинов, А. А. Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование : учеб. пособие для вузов по направлению подготовки 13.03.01 (140100) «Теплоэнергетика и теплотехника» / А. А. Кудинов. — М. : ИНФРА-М, 2015. — 323 с. — ISBN 978-5-16-004731-7.

Изложены основы теории повышения тепловой экономичности электростанций за счет применения пара высоких и сверхвысоких параметров, комбинированной выработки электрической и тепловой энергии, регенеративного подогрева питательной воды, промежуточного перегрева пара, использования газотурбинных и парогазовых установок. Описаны принципиальные тепловые схемы современных ТЭС, освещены вопросы выбора основного и вспомогательного оборудования, расчета тепловых схем, компоновки главного здания, технического водоснабжения и подготовки добавочной воды, топливного хозяйства и очистки уходящих газов. Для студентов энергетических вузов и специальностей.