

Федеральное агентство по образованию
Тверской государственный технический университет
Академия электротехнических наук РФ

**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ
В ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ,
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ**

Материалы Российской научно-технической конференции
г. Тверь, 22–23 апреля 2010 г.

Тверь 2010

УДК 536.33:621.365:669

ББК 31.19:34.3:31.3-я43

Энергосбережение в электро- и теплоэнергетических, металлургических установках. Тверь, 22–23 апреля 2010 г.: материалы Российской научно-технической конференции. Тверь: ТГТУ, 2010. 104 с.

Материалы представляют собой обобщённые результаты научно-исследовательских работ в области энергосбережения в металлургических установках, электрических и тепловых печах, в процессах передачи и распределения электрической энергии. Предложены математические модели для расчета экономичных режимов работы электродуговых, плазменно-дуговых сталеплавильных, рудно-термических печей, индукционных устройств нагрева, электротермических установок для процессов сушки. Осуществлён анализ потерь мощности и электроэнергии в системах электроснабжения, даны рекомендации по их снижению. Предложены модели расчёта электрических цепей, меры по повышению надёжности работы электрооборудования, совершенствованию систем учёта электроэнергии.

Рекомендованы в качестве учебного пособия для студентов специальности «Электроснабжение» при изучении дисциплины «Энергосбережение».

Могут быть использованы работниками научно-исследовательских организаций, персоналом металлургических предприятий, электро-технических и теплотехнических служб других отраслей промышленности, энергетики, а также преподавателями, аспирантами и студентами вузов.

Конференция подготовлена и проведена по плану проекта № 2.1.2/1856, финансируемого Рособразованием.

ISBN
978-5-7995-0508-0

© Тверской государственный
технический университет, 2010

ВВЕДЕНИЕ

Экономика России отличается от экономики индустриально-развитых стран более высоким энергопотреблением на единицу продукции. Энергоёмкость национального дохода превышает аналогичный показатель для развитых стран в 2,5-3 раза, причём эта тенденция сохраняется с 1960-х годов.

Большая разница в энергоёмкости внутреннего валового продукта (ВВП) и Евросоюза (ЕС) объясняется следующими факторами:

- различными климатическими условиями (три четверти территории России располагается в зоне вечной мерзлоты, среднее число градусо-дней отопительного периода в России в 1,5–2 раза выше, чем в Западной Европе и США);

- различиями в сфере промышленности (в России более высокий вес энергоёмких отраслей – металлургия, тяжёлое машиностроение, добыча и доставка энергоносителей и др.);

- потерями при передаче и распределении электрической и тепловой энергии (протяжённые электрические и тепловые сети, неэффективная тепловая изоляция);

- низкой эффективностью промышленных технологических процессов, зданий, физическим износом и моральным старением оборудования и домашних приборов.

В стране в 2000 г. принята «Энергетическая стратегия России до 2020 г.», в соответствии с которой снижение энергоёмкости ВВП на 50% достигается за счёт изменения структуры экономики, жёсткой политики в области энергосбережения при производстве и потреблении энергии. Реализация энергетической стратегии на промышленных предприятиях России осуществляется за счёт внедрения современных технологических процессов, автоматизированных систем контроля и учёта энергоресурсов, автономных источников энергии, использования вторичных энергетических ресурсов и отходов как топлива, утилизации низкопотенциального тепла с помощью тепловых насосов и

теплообменников, реконструкции тепловых сетей и использования новых теплоизоляционных материалов, внедрения частотного регулирования электроприводов. В результате проведенных работ по энергосбережению энергоёмкость ВВП в 2005 г. снизилась на 15% по сравнению с 2005 г.

Разработанные и изложенные в сборнике технические решения, математические модели, устройства, методики и мероприятия позволяют повысить эффективность работы металлургического, электротехнологического, теплотехнического оборудования, оптимизировать ресурс- и энергопотребление. Приведённые результаты исследований отличаются практической направленностью и теоретической новизной, что позволяет использовать их в промышленности и в вузах при подготовке студентов.

ОБОБЩЕННОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА УГЛОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ФАКЕЛА НА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ

Работа выполнена при финансовой поддержке Рособразования
(проект № 2.1.2/1856)

В [1 – 4] приведен вывод аналитических выражений для определения локальных угловых коэффициентов излучения вертикально расположенного линейного источника на параллельные, перпендикулярные и произвольно расположенные в пространстве плоскости, в [5] – вывод аналитического выражения для определения локального углового коэффициента излучения линейного источника (цилиндра) при его пересечении с плоскостью, причем элементарная площадка находится с внешней стороны линейного источника. Выведем аналитическое выражение для определения локального углового коэффициента излучения линейного источника (дуго, факела) на элементарную площадку, расположенную на плоскости, при взаимном пересечении линейного источника и плоскости. Элементарная площадка находится с внутренней стороны линейного источника (рис. 1).

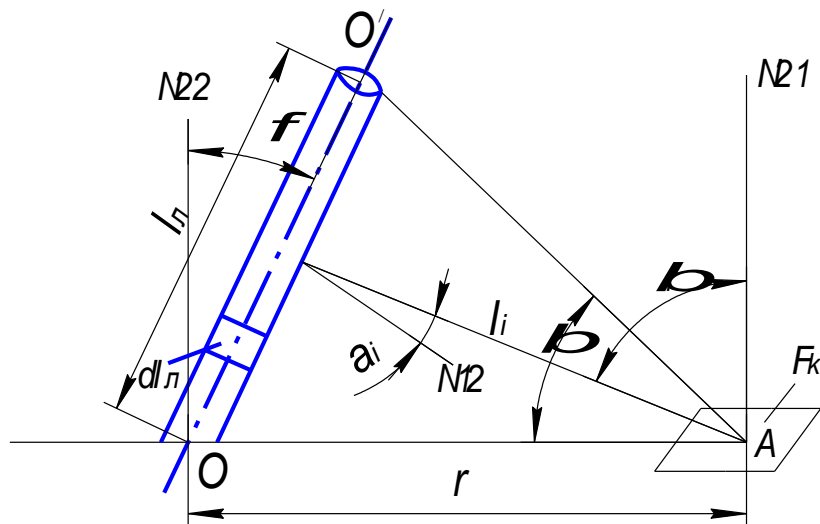


Рис. 1. Излучение цилиндра на элементарную площадку на поверхности ванны металла

На рис. 1 используются следующие условные обозначения: l_n – длина линейного источника излучения; dl_n – высота элементарного цилиндра; φ – угол между осью линейного источника OO' и нормалью $N22$ к

горизонтальной плоскости, проведенной через точку O ; r – расстояние от точки A до точки пересечения оси OO' с горизонтальной плоскостью; l_i – расстояние от элементарного цилиндра до элементарной площадки; α_i – угол между нормалью $N12$ к оси элементарного цилиндра и направлением излучения; β_i – угол между нормалью $N21$ к центру элементарной площадки и направлением излучения; β – угол, в пределах которого линейный источник излучает тепловой поток в расчетную точку A ; F_k – площадь поверхности элементарной площадки.

Локальный угловой коэффициент излучения линейного источника на элементарную площадку определяется суммированием элементарных угловых коэффициентов излучения элементарных цилиндров на элементарную площадку. Из [2] известно, что элементарный угловой коэффициент излучения определяется из выражения

$$d\varphi_{ik} = \cos\alpha_i \cos\beta_i F_k dl_{\pi} / (\pi^2 l_i^2 l_{\pi}). \quad (1)$$

Из теоремы синусов и рис. 1 можно записать:

$$l_i = [r \sin(\pi/2 - \varphi)] / [\sin(\pi/2 + \alpha_i)]; \quad (2)$$

$$\cos\beta_i = \sin(\varphi - \alpha_i); \quad (3)$$

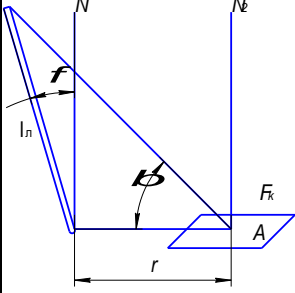
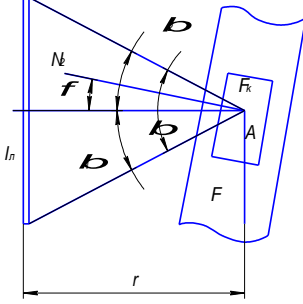
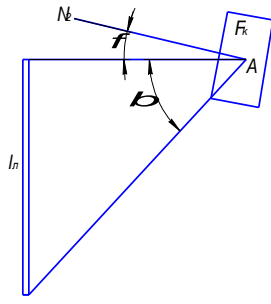
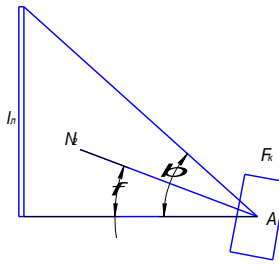
$$dl \cos\alpha_i = l_i d\alpha. \quad (4)$$

Угол α_i изменяется от φ до 0 и от 0 до $(\beta - \varphi)$; обозначим его соответственно α_{i1} и α_{i2} (рис. 1). Локальный угловой коэффициент излучения линейного источника на элементарную площадку, расположенную с внутренней стороны линейного источника, определим интегрированием выражения (1) после подстановки в него формул (2 – 4) в указанных пределах изменения α_{i1} и α_{i2} :

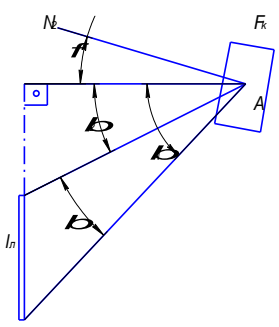
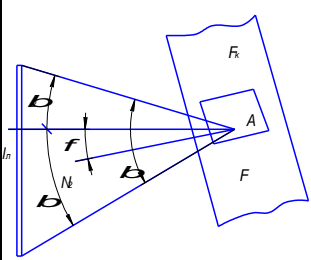
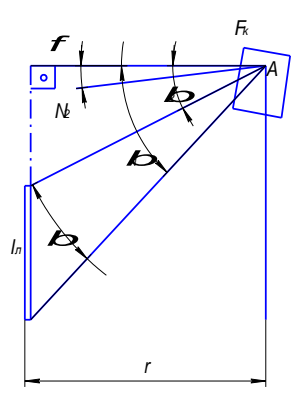
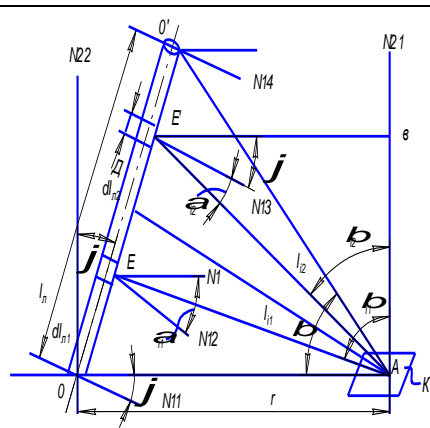
$$\begin{aligned} \varphi_{lk} = & \int_0^{\varphi} [F_k \sin(\varphi - \alpha_{i1}) \sin(\pi/2 + \alpha_{i1}) d\alpha_i] : [\pi^2 r l_{\pi} \sin(\pi/2 - \varphi)] + \\ & \int_0^{\beta - \varphi} [F_k \sin(\varphi + \alpha_{i2}) \sin(\pi/2 - \alpha_{i2}) d\alpha_2] : [\pi^2 r l_{\pi} \sin(\pi/2 - \varphi)] = \quad (5) \\ & \left[F_k / (2\pi^2 r l_{\pi}) \right] \left\{ [\sin^2(\beta - \varphi) - \sin^2 \varphi] + \operatorname{tg} \varphi [\beta + \sin \beta \cos(\beta - 2\varphi)] \right\}. \end{aligned}$$

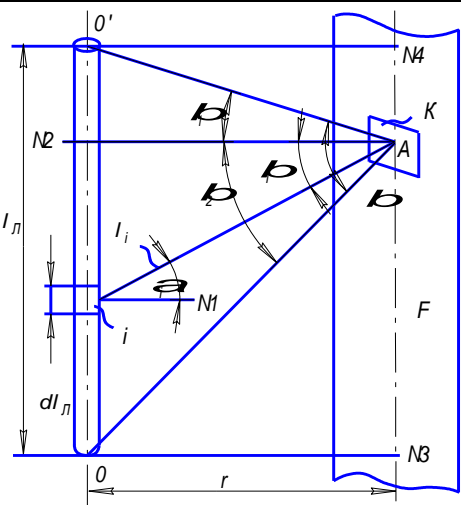
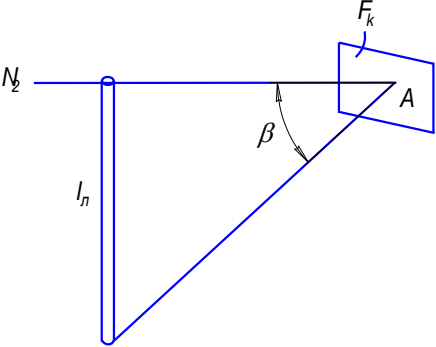
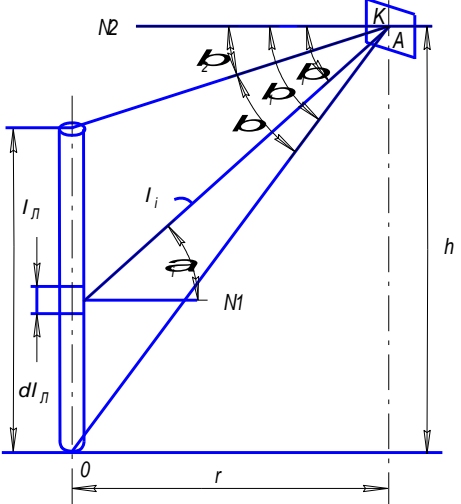
Таким образом, мы получили выражение для определения локального углового коэффициента излучения линейного источника (дуги факела) на расположенную на плоскости элементарную площадку, которая находится с внутренней стороны линейного источника. Сведем выражение (5), а также выражения для определения локальных угловых коэффициентов излучения линейного источника на элементарные площадки, которые будем использовать в расчетах, в таблицу, для чего воспользуемся аналитическими выражениями [1 – 4].

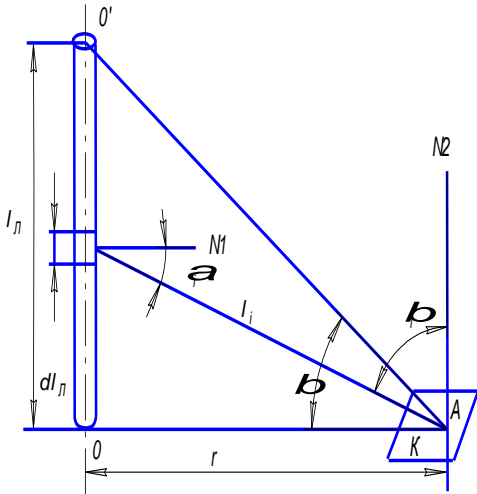
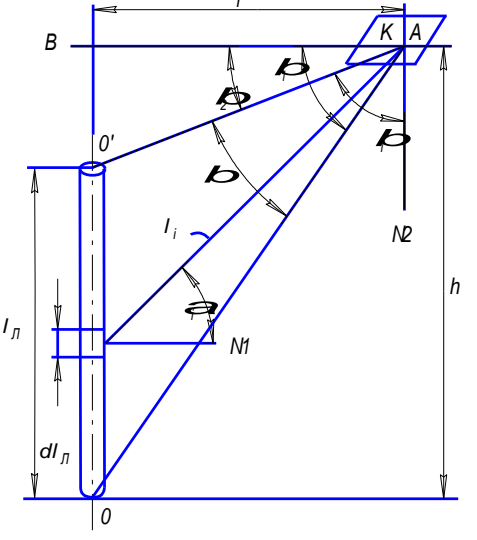
Локальные угловые коэффициенты излучения цилиндра на площадку

№ п/п	Схема взаимного расположения цилиндра и поверхности нагрева	Описание взаимного расположения цилиндра и поверхности нагрева	Локальный угловой коэффициент излучения цилиндра на площадку
1	2	3	4
1		Элементарная площадка, находящаяся на горизонтальной плоскости и цилиндр, образующий с горизонтальной плоскостью острый угол	$\varphi_{ik} = [F_k / (2\pi^2 r l_n)] \{ [\sin^2(\varphi + \beta) - \sin^2 \varphi] - \operatorname{tg} \varphi [\beta + \cos(2\varphi + \beta) \sin \beta] \}$
2		Цилиндр и элементарная площадка, находящаяся на плоскости, наклоненной вправо от вертикальной оси, напротив цилиндра	$\varphi_{ik} = [F_k / (2\pi^2 r l_n)] \{ \cos \varphi [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 - \beta_2)] - \sin \varphi (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2) \}$
3		Цилиндр и элементарная площадка, находящаяся на плоскости, наклоненной вправо от вертикальной оси; центр площадки находится напротив верхнего среза цилиндра	$\varphi_{ik} = [F_k / (2\pi^2 r l_n)] \times \left[\cos \varphi \left(\beta + \frac{1}{2} \sin 2\beta \right) - \sin \varphi \sin^2 \beta \right]$
4		Цилиндр и элементарная площадка, находящаяся на плоскости, наклоненной вправо от вертикальной оси; центр площадки находится напротив нижнего среза цилиндра	$\varphi_{ik} = [F_k / (2\pi^2 r l_n)] \times \left[\cos \varphi \left(\beta + \frac{1}{2} \sin 2\beta \right) + \sin \varphi \sin^2 \beta \right]$

Продолжение таблицы

1	2	3	4
5		<p>Цилиндр и элементарная площадка, находящаяся на плоскости, наклоненной вправо от вертикальной оси выше верхнего среза цилиндра</p>	$\varphi_{lk} = [F_k / (2\pi^2 r l_n)] \{ \cos \varphi [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 + \beta_2) - \sin \varphi (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2)] \}$
6		<p>Цилиндр и элементарная площадка, находящаяся на плоскости, наклоненной влево от вертикальной оси, напротив цилиндра</p>	$\varphi_{lk} = [F_k / (2\pi^2 r l_n)] \{ \cos \varphi [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 - \beta_2)] + \sin \varphi (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2) \}$
7		<p>Цилиндр и элементарная площадка, находящаяся на плоскости, наклоненной влево от вертикальной оси, выше среза цилиндра</p>	$\varphi_{lk} = [F_k / (2\pi^2 r l_n)] \{ \cos \varphi [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 + \beta_2) + \sin \varphi (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2)] \}$
8		<p>Элементарная площадка, находящаяся на горизонтальной плоскости, и цилиндр, образующий с горизонтальной плоскостью острый угол</p>	$\varphi_{lk} = F_k / (2\pi^2 r l_n) \times \left\{ \left[\sin^2 (\beta - \varphi) - \sin^2 \varphi \right] + \left[\sin^2 (\beta + \varphi) - \sin^2 \varphi \right] + \left[\sin^2 (\beta - \varphi) - \sin^2 \varphi \right] \right\}$

1	2	3	4
9		<p>Цилиндр и элементарная площадка находятся во взаимно-параллельных плоскостях, элементарная площадка – напротив дуги</p>	$\varphi_{\lambda K} = [F_k / (2\pi^2 r l_n)] \times [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 - \beta_2)]$
10		<p>Цилиндр и элементарная площадка находятся во взаимно-параллельных плоскостях, нормаль к элементарной площадке проходит через нижнее или верхнее основание цилиндра</p>	$\varphi_{lk} = \frac{F_K}{2\pi^2 r \lambda_l} \times (\beta + 0,5 \sin 2\beta)$
11		<p>Цилиндр и элементарная площадка находятся во взаимно-параллельных плоскостях, элементарная площадка находится на произвольной высоте</p>	$\varphi_{\lambda K} = \frac{F_K}{2\pi^2 r \lambda_l} \times [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 + \beta_2)]$

1	2	3	4
12		<p>Цилиндр и элементарная площадка находятся во взаимно-перпендикулярных плоскостях; плоскость, на которой расположена элементарная площадка, проходит через основание дуги</p>	$\varphi_{\lambda k} = \int_0^{\beta_1} \frac{\sin \alpha_i \cos \alpha_i F_k}{\pi^2 r \lambda_l} d\alpha =$ $= \frac{F_k}{2\pi^2 r \lambda_l} \sin^2 \beta$
13		<p>Цилиндр и элементарная площадка находятся во взаимно-перпендикулярных плоскостях; элементарная площадка находится на произвольной высоте</p>	$\varphi_{\lambda k} = \int_{\beta_2}^{\beta_1} \frac{\sin \alpha_i \cos \alpha_i F_k}{\pi^2 r \lambda_l} d\alpha =$ $= \frac{F_k}{2\pi^2 r \lambda_l} (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2)$

Проанализировали аналитические выражения для определения локальных угловых коэффициентов излучения цилиндра на элементарные площадки (таблица). Отличие выражений в пунктах (2–7) таблицы в том, что в зависимости от взаимного расположения дуги и поверхности нагрева угол β_2 и $\sin \varphi$ меняют знаки с положительного на отрицательный. После анализа выражений пунктов (2–7) таблицы получили обобщенное аналитическое выражение для определения локальных угловых коэффициентов излучения цилиндра на элементарные площадки при их различном пространственном положении:

$$\varphi_{lk} = \frac{F_k}{2\pi^2 r l_l} \left\{ \cos \varphi [\beta + \sin \beta \cos (\beta_1 \pm \beta_2)] \pm \sin \varphi (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2) \right\}.$$

Из обобщенного аналитического выражения можно получить аналитическое выражение для расчета локального углового коэффициента излучения цилиндра на элементарную площадку при их нахождении во взаимно-параллельных плоскостях, то есть выражение пункта (9) таблицы:

$$\varphi_{lk} = \frac{F_k}{2\pi^2 r l_{\text{л}}} \left\{ \cos 0^\circ [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 - \beta_2)] - \sin 0^\circ (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2) \right\} =$$

$$= \frac{F_k}{2\pi^2 r l_{\text{л}}} [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 - \beta_2)]$$

При прохождении нормали к элементарной площадке N2 через верхнее или нижнее основание цилиндра из аналитического выражения пункта (6) получаем выражение для расчета локального углового коэффициента излучения цилиндра на площадку для случая, когда цилиндр и элементарная площадка находятся во взаимно-параллельных плоскостях, нормаль к элементарной площадке проходит через нижнее или верхнее основание цилиндра:

$$\varphi_{lk} = \frac{F_k}{2\pi^2 r l_{\text{л}}} \left\{ \cos 0^\circ [\beta + \sin \beta \cos \beta] \right\} = \frac{F_k}{2\pi^2 r l_{\text{л}}} \left(\beta + \frac{1}{2} \sin 2\beta \right).$$

В случае, когда элементарная площадка расположена за пределами проекции цилиндра на плоскость F угол β_2 в обобщенном аналитическом выражении (6) меняет знак, и получаем аналитическое выражение для определения локального углового коэффициента излучения цилиндра на площадку при расположении цилиндра и элементарной площадки во взаимно-параллельных плоскостях, элементарная площадка находится на произвольной высоте:

$$\varphi_{lk} = \frac{F_k}{2\pi^2 r l_{\text{л}}} \left\{ \cos 0^\circ [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 + \beta_2)] \right\} = \frac{F_k}{2\pi^2 r l_{\text{л}}} [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 + \beta_2)].$$

Из выражения пункта (6) получаем аналитическое выражение для определения локального углового коэффициента излучения цилиндра на площадку. Цилиндр и элементарная площадка находятся во взаимно-перпендикулярных плоскостях, плоскость, на которой расположена элементарная площадка, проходит через нижнее основание цилиндра (случай излучения вертикального цилиндра на ванну металла):

$$\varphi_{lk} = \frac{F_k}{2\pi^2 r l_{\text{л}}} \left\{ \cos 90^\circ [\beta + \sin \beta \cos \beta] + \sin 90^\circ \cdot \sin^2 \beta \right\} = \frac{F_k}{2\pi^2 r l_{\text{л}}} \sin^2 \beta.$$

Аналогично из выражения пункта (6) получаем аналитическое выражение для расчета локального углового коэффициента излучения цилиндра на площадку, дуга и элементарная площадка находятся во взаимно-перпендикулярных плоскостях, элементарная площадка находится на произвольной высоте:

$$\begin{aligned}\varphi_{lk} &= \frac{F_k}{2\pi^2 r l_{\text{л}}} \left\{ \cos 90^\circ \left[\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 + \beta_2) \right] + \sin 90^\circ (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2) \right\} \\ &= \frac{F_k}{2\pi^2 r l_{\text{л}}} (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2).\end{aligned}$$

Аналогичным образом из обобщенного аналитического выражения пункта (6) получаем выражение для расчета локального углового коэффициента цилиндра на площадку, элементарная площадка находится на плоскости, наклоненной вправо от вертикальной оси, напротив цилиндра:

$$\varphi_{lk} = \frac{F_k}{2\pi^2 r l_{\text{л}}} \left\{ \cos \varphi \left[\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 - \beta_2) \right] - \sin \varphi (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2) \right\}.$$

При нахождении центра элементарной площадки напротив верхнего основания цилиндра выражение пункта (6) принимает вид

$$\begin{aligned}\varphi_{lk} &= \frac{F_k}{2\pi^2 r l_{\text{л}}} \left\{ \cos \varphi [\beta + \sin \beta \cos \beta] - \sin \varphi \sin^2 \beta \right\} = \\ &= \frac{F_k}{2\pi^2 r l_{\text{л}}} \left[\cos \varphi \left(\beta + \frac{1}{2} \sin 2\beta \right) - \sin \varphi \sin^2 \beta \right].\end{aligned}$$

Получили аналитическое выражение для расчета локального углового коэффициента излучения цилиндра на элементарную площадку, находящуюся на плоскости, наклоненной вправо от вертикальной оси; центр площадки находится напротив верхнего среза цилиндра. При определении локального углового коэффициента излучения цилиндра на элементарную площадку, находящуюся на плоскости, наклоненную вправо от вертикальной оси, центр площадки находится напротив нижнего среза цилиндра, функция $\sin \varphi$ меняет знак, и выражение принимает вид

$$\varphi_{lk} = \frac{F_k}{2\pi^2 r l_{\text{л}}} \left[\cos \varphi \left(\beta + \frac{1}{2} \sin 2\beta \right) + \sin \varphi \sin^2 \beta \right].$$

Выражение (6) для определения локального углового коэффициента излучения цилиндра на элементарную площадку, находящуюся на плоскости, наклоненную вправо от вертикальной оси, выше верхнего основания цилиндра принимает вид

$$\varphi_{lk} = \frac{F_k}{2\pi^2 r l_{\text{л}}} \left\{ \cos \varphi [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 + \beta_2)] - \sin \varphi (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2) \right\}.$$

Выражение пункта (6) для расчета локального углового коэффициента излучения цилиндра на элементарную площадку, находящуюся на плоскости, наклоненную влево от вертикальной оси, напротив цилиндра имеет вид

$$\varphi_{lk} = \frac{F_k}{2\pi^2 r l_{\text{л}}} \left\{ \cos \varphi [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 - \beta_2)] + \sin \varphi (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2) \right\}.$$

При нахождении элементарной площадки на плоскости, наклоненной влево от вертикальной оси, выше верхнего основания цилиндра аналитическое выражение пункта (6) для определения локального углового коэффициента излучения цилиндра принимает вид

$$\varphi_{lk} = \frac{F_k}{2\pi^2 r l_{\lambda}} \left\{ \cos \varphi \left[\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 + \beta_2) \right] + \sin \varphi (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2) \right\}.$$

Представленные в таблице аналитические выражения для определения локальных угловых коэффициентов излучения цилиндра на элементарные площадки охватывают все возможные случаи взаимного расположения факела и поверхностей нагрева и используются при расчете теплообмена в факельных, электродуговых, плазменно-дуговых печах.

Библиографический список

1. Макаров, А.Н. Определение угловых коэффициентов излучения линейного источника на плоские поверхности /А.Н. Макаров // Вторая Российская национальная конференция по теплообмену: труды конференции. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. М.: Изд-во МЭИ, 1998. Т. 6. С. 312-313.
2. Макаров, А.Н. Определение угловых коэффициентов излучения линейного источника на параллельные и перпендикулярные плоскости / А.Н. Макаров // Теплоэнергетика. 1997. №1. С. 65-68.
3. Макаров, А.Н. Определение угловых коэффициентов излучения линейного источника на произвольно расположенные плоскости / А.Н. Макаров // Теплоэнергетика. 1998. №12. С.58-62.
4. Макаров, А.Н. Определение угловых коэффициентов излучения линейного источника и факела топок паровых котлов /А.Н. Макаров // Теплоэнергетика. 2000. №8. С.63-66.
5. Макаров, А.Н. Оптимальные тепловые режимы дуговых сталеплавильных печей / А.Н. Макаров, А.Д. Свенчанский. М.: Энергоатомиздат, 1992. 96 с.

Макаров А.Н., Дюндин А.С.

Тверской государственный технический университет

ТЕПЛООБМЕН В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В последнее время появляется всё больше опытных данных об изменении температуры по поверхности, длине, высоте и объёму в камерах сгорания газотурбинных двигателей. Анализ этих данных позволил

скорректировать существующую методику расчёта теплообмена в камерах сгорания газотурбинных двигателей.

Теплообмен излучением является основным видом теплообмена в факельных нагревательных и плавильных печах, топках паровых котлов. Тепловые потоки, падающие на поверхности нагрева от газового или мазутного факела, на 92–98% состоят из потока излучения, и на 2–8% - из конвективного потока. Методика расчёта потоков излучений, падающих от факела на поверхности нагрева в печах и топках, приемлема и для расчёта потоков излучений от факела, падающих на поверхности нагрева в камерах сгорания газотурбинных двигателей.

Надёжность работы камеры сгорания определяется температурой и равномерностью нагрева стенки пламенной трубы. Расчёт температуры стенки выполняют на основе уравнения теплового баланса элемента стенки:

$$Q_{\phi.\lambda} + Q_{\phi.K} = Q_{B.K} + Q_{B.\lambda} = Q_{B.K} + Q_{K.K}, \quad (1)$$

где $Q_{\phi.\lambda}$ и $Q_{\phi.K}$ – количество теплоты, отданное факелом пламенной трубе в результате лучеиспускания и путём конвекции; $Q_{B.K}$ и $Q_{B.\lambda}$ – количество теплоты, отданное пламенной трубой охлаждающему воздуху путём конвекции и в результате лучеиспускания; $Q_{K.K}$ – количество теплоты, отданное силовым корпусом охлаждающему воздуху путём конвекции.

Слагаемые в уравнении (1) определяются по следующим формулам:

$$Q_{\phi.\lambda} = 0,5(1 + \varepsilon_{CT}) \varepsilon_{\phi} C_0 F_{\Pi.T} (T_{\phi.\text{ЭФ}}^4 - T_{\Pi.T.CP}^4); \quad (2)$$

$$Q_{\phi.K} = \alpha_{\phi.\Pi.T} \cdot F_{\Pi.T} \cdot \Delta T_{Г.Ф}; \quad (3)$$

$$Q_{B.K} = \alpha_{\Pi.T.B} \cdot F_{\Pi.T} \cdot \Delta T_{\Pi.T.B}; \quad (4)$$

$$Q_{B.\lambda} = \varepsilon_{\Pi} C_0 F_{\Pi.T} \cdot (T_{\Pi.T}^4 - T_K^4), \quad (5)$$

где ε_{CT} и ε_{ϕ} – коэффициенты излучения соответственно материала стенки пламенной трубы и факела; C_0 – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела; $F_{\Pi.T}$ – площадь внутренней поверхности пламенной трубы; $T_{\phi.\text{ЭФ}}$ и $T_{\Pi.T.CP}$ – эффективная температура факела и средняя температура пламенной трубы; $\alpha_{\phi.\Pi.T}$ – коэффициент теплоотдачи от факела к стенке трубы; $\Delta T_{Г.Ф}$ – средняя эффективная разность температур газо-воздушного потока и пламенной трубы; $\alpha_{\Pi.T.B}$ – коэффициент теплоотдачи от пламенной трубы к охлаждающему воздуху; $\Delta T_{\Pi.T.B}$ – средняя эффективная разность температур поверхности

пламенной трубы и воздуха; ε_{Π} – приведённый коэффициент излучения (равен $0,67 \div 0,71$); $T_{\Pi.T}$ и T_K – температуры наружной поверхности пламенной трубы и внутренней поверхности корпуса.

В настоящее время накопилось много факторов, доказывающих необходимость корректировки существующей методики расчёта теплообмена излучением в факельных печах, топках, камерах сгорания. Газовое излучение характеризуется несколько более слабой зависимостью от температуры, чем излучение серых твёрдых тел. Излучение паров углекислоты пропорционально температуре в степени 3,5, а излучение водяного пара – температуре в степени 3. В практических расчётах для упрощения методики принимают, что величина излучения газов пропорциональна четвёртой степени их температуры, при этом вводятся температурные поправки в степени черноты этих газов.

Повышение температуры факела без увеличения его мощности не приводит к росту производительности печей. Определяющее влияние на плотность падающих на поверхности нагрева потоков излучений факела оказывает его мощность, а не температура. При одной и той же температуре факела, но различной мощности, выделяющейся в нём, будут разные потоки излучения, падающие на поверхность нагрева, и результирующие потоки. От распределения мощности по длине факела зависит распределение падающих потоков его излучений по поверхностям нагрева. В некоторых источниках приводятся данные о незначительном снижении мощности факела при уменьшении его температуры, что подтверждает неопределяющее влияние температуры факела на процессы его теплообмена с поверхностями нагрева.

Мощность факела, а следовательно, производительность по нагреву изделий, можно повысить, увеличив расход топлива или используя топливо с более высокой теплотой сгорания, что видно из следующего выражения:

$$P_{\phi} = Q_H^P \cdot B_K, \quad (6)$$

где P_{ϕ} – мощность факела, Q_H^P, B_K – теплота сгорания и расход топлива.

Для снижения выхода оксидов азота осуществляют рециркуляцию продуктов сгорания. Введение газов рециркуляции в топочные камеры обеспечивает уменьшение температуры факела и выравнивание температурных полей без снижения производительности котлоагрегата. Это ещё раз доказывает определяющее влияние теплоты сгорания и расхода топлива, а не температуры факела, на теплообмен излучением в факельных печах.

Для подавления термических оксидов азота используется также впрыск воды или водяного пара в зону горения топлива (газа и мазута). Уменьшение образования оксидов азота происходит в результате

снижения температуры в зоне горения топлива на 10–12%. Впрыск влаги осуществляется непосредственно в ядро горения, температура факела снижается без уменьшения его мощности и производительности котлоагрегата. Для снижения температуры факела и подавления эмиссии оксидов азота в топках паровых котлов применяют двухступенчатое сжигание топлива, когда через основные горелки в топку подаётся топливо с недостатком воздуха, а остальная часть воздуха направляется далее по факелу через специальные сопла или отключенные горелки верхних ярусов.

Известно, что с увеличением разности температур между изделием и факелом результирующий поток излучения на нагреваемое тело возрастает. Однако, как показывает практика эксплуатации факельных печей и топок, при снижении температуры факела на 10–20% без уменьшения расхода топлива производительность печей и поток остаются на прежнем уровне, т.е. теплообмен излучением не ухудшается. Расчёты же показывают, что при снижении температуры факела на 10–20% результирующий поток на нагреваемое тело уменьшится в 1,5–2 раза.

Разрешить существующее противоречие теории и практики помогает предлагаемая методика расчёта теплообмена излучением в факельных печах, топках, камерах сгорания. При этом в расчёте фигурирует мощность факела и отдельных его объёмных зон: чем больше мощность факела, тем больший тепловой поток следует ожидать на нагреваемое изделие. Чем больше мощность выделяется в объёмной зоне факела, тем больше тепловой поток падает от данной объёмной зоны на поверхности нагрева. Для определения доли мощности, выделяющейся в объёмных зонах факела, предложено использовать закон Стефана-Больцмана.

Опытные данные показывают, что мощность факела неравномерно распределена по объёму камеры сгорания газотурбинного двигателя, что в свою очередь сказывается на неравномерности распределения тепловых потоков от факела по поверхностям камеры сгорания.

Расчёт плотности суммарных интегральных тепловых потоков, падающих на i -е площадки, расположенные на поверхности камеры сгорания, от факела, нагретых поверхностей, конвективных потоков факела производим следующим образом:

$$q_{iП} = q_{iП.Ф} + q_{iП.О.Ф} + q_{iП.П} + q_{iП.О.П} + q_{iФ.К}, \quad (7)$$

где $q_{iП.Ф}$ – плотность интегрального потока излучения, падающего на i -ю площадку на поверхности камеры сгорания от факела, с учётом поглощения излучения факела; $q_{iП.О.Ф}$ – плотность интегрального потока излучения, падающего на i -ю площадку, вызванного отражением излучения факела от поверхностей камеры сгорания; $q_{iП.П}$ – плотность

интегрального потока излучения, падающего на i -ю площадку от излучающих поверхностей камеры сгорания, с учётом поглощения излучения; $q_{iП.О.П}$ – плотность интегрального потока излучения, падающего на i -ю площадку, вызванного отражением излучения от поверхностей стенок камеры сгорания; $q_{iФ.К}$ – плотность теплового потока, переданного от факела на i -ю площадку путём конвекции.

Слагаемые в выражении (7) определяются по формулам:

$$q_{iП.Ф} = \sum_1^n \frac{\varphi_{\Phi ji} P_{\Phi j}}{F_i} e^{-ki}, \quad (8)$$

где $\varphi_{\Phi ji}$ – локальный угловой коэффициент излучения j -го цилиндра, которым моделируется элементарный объём факела, на i -ю площадку; $P_{\Phi j}$ – мощность j -го цилиндра; $k = 4,774$ – коэффициент ослабления излучения; l – среднее расстояние по оси цилиндра до i -й площадки; F_i – площадь i -й элементарной площадки;

$$q_{iП.О.Ф} = \sum_1^n \frac{P_{\Phi j} (\psi_{\Phi jk} - \varphi_{\Phi jk} e^{-kS})}{F_k}, \quad (9)$$

где $\psi_{\Phi jk}$ – обобщённый угловой коэффициент излучения j -й объёмной зоны (j -го цилиндра) на k -ю поверхность; $\varphi_{\Phi jk}$ – средний угловой коэффициент излучения j -го цилиндра на k -ю поверхность; $S \approx 3,6V / F_{П.Т}$ – эффективная длина пути луча; V – объём камеры сгорания; F_k – площадь расчётной k -й поверхности;

$$q_{iП.П.} = \sum_1^n \frac{\varphi_{ji} Q_{jc}}{F_i} e^{-kl}, \quad (10)$$

где φ_{ji} – локальный угловой коэффициент излучения j -й поверхности на i -ю; Q_{jc} – поток собственного излучения j -й поверхности;

$$q_{iП.О.П} = \sum_1^n \frac{Q_{jc} (\psi_{jk} - \varphi_{jk} e^{-kS})}{F_k}, \quad (11)$$

где ψ_{jk} и φ_{jk} – обобщённый и средний угловые коэффициенты излучения j -й поверхности на k -ю;

$$q_{iФ.К} = Q_{Ф.К} / F_{П.Т}. \quad (12)$$

Результирующий поток i -й площадки, вызывающий её нагрев, определяется как разность суммарного интегрального теплового потока,

падающего на площадку, и эффективного, характеризующего общий поток излучения, исходящего от i -й площадки:

$$q_{iP.H} = q_{iП} - q_{iЭ} = q_{iП} \frac{R_i \sum_{k=1}^n \Phi_{ki} Q_{kc} + Q_{ic}}{F_i}, \quad (13)$$

где R_i – коэффициент отражения i -й поверхности; Φ_{ki} – разрешающий угловой коэффициент излучения k -й поверхности на i -ю; Q_{kc} – собственное излучение k -й поверхности; Q_{ic} – собственное излучение i -й поверхности.

Результат теплообмена, нагрев и охлаждение стенок камеры сгорания зависят от разности результирующего потока, вызывающего нагрев стенок, и результирующего потока, который определяется по выражению

$$q_{iПO} = q_{iBK} + q_{iKK}, \quad (14)$$

где q_{iBK} – локальная плотность теплового потока, отданного пламенной трубой охлаждающему воздуху путём конвекции; q_{iKK} – плотность теплового потока, отданного корпусом охлаждающему воздуху путём конвекции.

Слагаемые суммы (14) определяются следующим образом:

$$q_{iKK} = \frac{\alpha_{KB} F_K \Delta T_{KB}}{F_K}, \quad (15)$$

где α_{KB} – коэффициент теплоотдачи от корпуса воздуху; F_K – площадь внутренней поверхности корпуса; ΔT_{KB} – средняя разность температур корпуса и воздуха;

$$q_{iBK} = \frac{Q_{BK}}{F_{ПТ}} = \frac{\alpha_{ПТВ} F_{ПТ} \Delta T_{ПТВ}}{F_{ПТ}}. \quad (16)$$

Коэффициент теплоотдачи от пламенной трубы к охлаждающему воздуху

$$\alpha_{inT} = Nu \frac{\lambda_B}{d_{ПТЭ}} = 0.018 Re^{0.8} \frac{\lambda_B}{d_{ПТЭ}}, \quad (17)$$

где Nu – число Нуссельта; λ_B – коэффициент теплоотдачи воздуха; $d_{ПТЭ}$ – эквивалентный диаметр пламенной трубы; Re – число Рейнольдса.

Число Рейнольдса определяем по выражению

$$Re = \frac{w d_{ПТЭ}}{\nu}, \quad (18)$$

где w – скорость движения охлаждающего воздуха; ν – кинематическая вязкость охлаждающего воздуха.

Макаров А.Н., Соколов А.Ю., Зуйков Р.М.

Тверской государственный технический университет

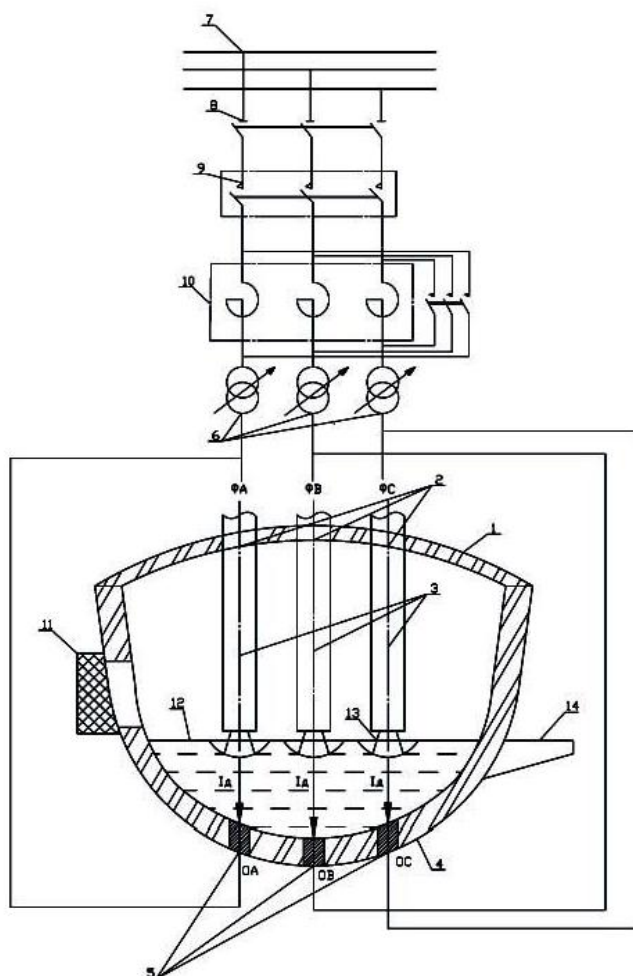
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В современном производстве стали широко применяются дуговые сталеплавильные печи (ДСП), причем доля выплавки стали в ДСП непрерывно увеличивается. Это объясняется рядом причин, в том числе тем, что в ДСП могут выплавляться любые марки стали, а процесс ведения плавки поддается регулированию и автоматизации. Увеличение выплавки электростали связано с ростом емкости электропечей и мощности печных трансформаторов. В настоящее время в России действуют сверхмощные ДСП-100 с печными трансформаторами мощностью 95 МВА. В Японии работают ДСП емкостью до 400 тонн и мощностью печных трансформаторов до 200 МВА. Таким образом, сегодня процесс выплавки электростали является весьма энергоемким. Поэтому улучшение работы ДСП, повышение их технико-экономических и энергетических показателей являются актуальными и важными задачами.

Общеизвестна конструкция трехэлектродной ДСП переменного тока с питанием фаз от вторичных обмоток трехфазного силового трансформатора [1]. Однако работа такой печи имеет существенный недостаток. При протекании переменного тока между электродами отдельных фаз возникает электродинамическое усилие, вызывающее движение и отклонение столба дуги в сторону футеровки. Эффект объясняется следующим образом [2]. Ток, протекающий по жидкометаллической ванне печи, создает электромагнитное поле, направленное по касательной к окружности, центром которой является электрическая ось токопроводящего поверхностного слоя жидкого металла. По отношению к столбу дуги это поле является поперечным, взаимодействие его с током дуги вызывает появление электромагнитной силы, направленной в сторону футеровки по линии, где электрод и стенка печи находятся на минимальном расстоянии.

Действие отклоняющей силы приводит к выдуванию дуги из-под электрода. В результате дуга работает под наклоном, что приводит к увеличению излучения на свод и стены и, как следствие, к снижению КПД дуги и производительности печи.

Эффект выдувания дуг из-под электродов устраняется в ДСП переменного тока с автономным питанием фаз [3]. Устройство и схема электроснабжения такой печи представлены на рисунке.



Устройство и схема электроснабжения ДСП с автономным питанием фаз: 1 – свод; 2 – отверстия; 3 – сводовые электроды; 4 – под;
5 – подовые электроды; 6 – однофазные трансформаторы; 7 – линия высокого напряжения; 8 – разъединители; 9 – выключатели;
10 – реакторы; 11 – рабочее окно; 12 – жидкометаллическая ванна;
13 – дуги; 14 – сливное отверстие

Печь имеет три подовых электрода, расположенных по вершинам правильного треугольника соосно сводовым электродам и являющихся нулем каждой фазы. Питание печи осуществляется через три однофазных электропечных трансформатора. Электроды подключаются к трансформаторам пофазно. При таком устройстве печи все фазы работают независимо друг от друга, поэтому путь тока через металл будет вертикальным. При этом отклоняющая сила не возникает и выдувание дуги из-под электрода отсутствует, дуги горят строго вертикально под электродами. Действующее на дуги переменного тока собственное электромагнитное поле создает радиальное усилие, которое сжимает дуги

и выдавливает из-под них металл. В результате электромагнитного давления дуги заглубляются в металл, их излучение на металл возрастает. КПД дуг, то есть отношение полезной мощности дуг, идущей на нагрев и расплавление шихты и нагрев жидкометаллической ванны, ко всей мощности дуг, увеличивается, так как уменьшается мощность, излучаемая дугами на свод и стены, и соответственно, увеличивается производительность печи, снижается время плавки и расход электроэнергии.

Эффективность использования ДСП с автономным питанием дуг количественно подтверждается расчетом теплообмена в печи. Основными расчетными величинами при этом являются угловые коэффициенты излучения. В расчетах теплообмена используются элементарные, локальные и средние угловые коэффициенты. Обобщающими показателями являются средние угловые коэффициенты, которые показывают, какая часть тепловой мощности, выделяемой столбом дуги, попадает на расчетную поверхность рабочего пространства печи.

Расчеты показали, что средний угловой коэффициент для стандартной ДСП трехфазного тока составил 0,68, а для ДСП с автономным питанием дуг – 0,72.

Результаты расчета позволяют сделать вывод, что в печи переменного тока с автономным питанием фаз возрастает доля излучения дуг на металл за счет устранения ее выдувания из-под электрода. Увеличение этого параметра оказывает существенное влияние на технико-экономические параметры печи: повышается КПД дуг, за счет чего снижается время плавки и расход электроэнергии, увеличивается производительность печи. Снижение расхода электроэнергии имеет существенное значение для приоритетного во всех отраслях электроэнергетики направления на развитие энергосберегающих технологий. Уменьшение времени выплавки металла и увеличение производительности печи открывает для металлургической отрасли перспективы роста экономических показателей производства.

Расчеты показали, что в печи с автономным питанием фаз за счет вертикального горения дуг и уменьшения их открытой части, тепловая нагрузка на футеровку стен значительно меньше, чем в стандартной печи трехфазного тока. Это позволяет увеличить диаметр распада электродов и, как следствие, равномерность нагрева металла. Кроме того, уменьшение потоков излучения дуг на футеровку стен повышает срок службы печи, снижает время простоев на ремонт.

Следует также отметить, что питание печи от группы однофазных трансформаторов дает возможность получить повышенный коэффициент мощности за счет более рациональной конструкции короткой сети и регулировать независимо мощности и напряжения каждой фазы.

Последнее обстоятельство позволяет уменьшить тепловой поток дуг и испарение металла в печи.

Таким образом, применение ДСП переменного тока с автономным питанием фаз позволяет уменьшить излучение дуг на футеровку печи и, как следствие, увеличить производительность печи и срок ее службы, уменьшить расход электроэнергии и электродов. Учитывая энергоемкость современной электрометаллургии, экономический эффект от применения печей с автономным питанием фаз представляется весьма значительным.

Библиографический список

1. Болотов, А.В. Электротехнологические установки: учеб. для вузов по спец. «Электроснабжение промышленных предприятий» / А.В. Болотов, Г.А. Шепель. М.: Высшая школа, 1988.
2. Макаров, А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных печах и топках паровых котлов: учеб. пособие / А.Н. Макаров. Тверь: ТГТУ, 2003.
3. Пат. 2368670 Россия, МПК C21C 5/52. Способ плавки стали в дуговой сталеплавильной печи трехфазного тока / А.Н. Макаров, А.Ю. Соколов. № 2007144749; заявл. 03.12.2007.

Рыжков О.И., Усова Г.И., Силин В.Е., Рыжков А.Ф.

Уральский государственный технический университет

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ ГРАНУЛИРОВАННОГО ТОПЛИВА

Водотопливные суспензии в настоящее время используются в некоторых промышленных технологиях газификации и сжигания топлива. Мокрое гранулирование низкосортного топлива с получением относительно крупных частиц (гранул) является одним из возможных технических решений для их энергетического использования.

В проводившихся опытах было изучено выгорание цилиндрических гранул каменного угля, торфа, древесной шлифпыли диаметром 12 мм и длиной 20 мм (рис. 1) при температурах из диапазона 400–800 °С с шагом 100 °С. Гранулирование проводилось путем смешения сухого пылевидного материала с водой. Характеристики использовавшихся образцов топлива приведены в таблице.

Характеристики использовавшихся образцов

Топливо	Плотность, кг/м ³	Влажность, %	Летучие, %	Зольность, %
Шлифпыль	980	72	82	4,5
Торф	870	75	70	9
Уголь	1100	30	27	47

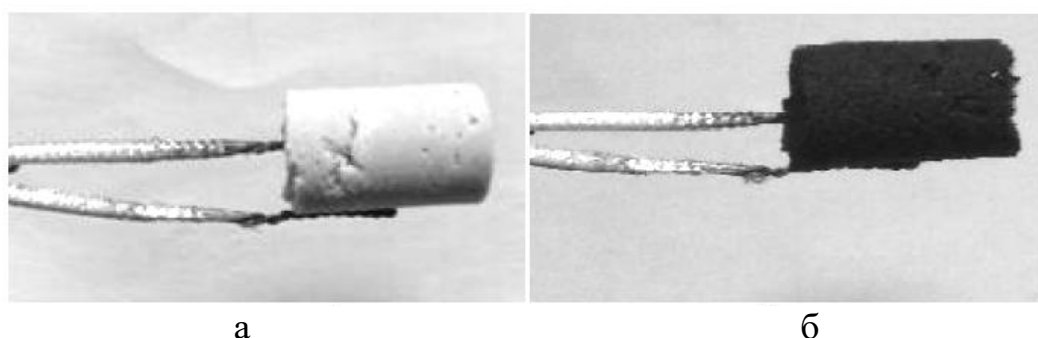


Рис. 1. Топливные гранулы на термопарах:
а – шлифпыли; б – торфа

Для проведения серии опытов была собрана экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 2.

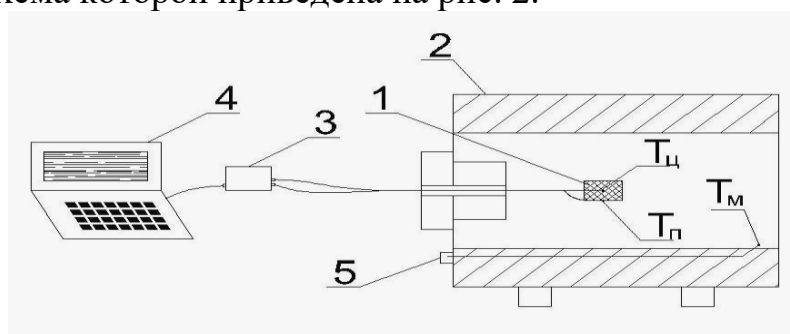


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 – образец; 2 – муфельная печь; 3 – прибор УКТ38; 4 – компьютер;
5 – указатель температуры муфеля; $T_{ц}$ – термопара типа ХА для замера температуры в центре образца; $T_{п}$ – термопара типа ХА для замера температуры на поверхности образца; $T_{м}$ – термопара типа ХА для контроля температуры в печи

В результате опытов были получены термограммы, переведенные в относительные единицы (рис. 3). В ходе опыта при температуре печи 400 °С летучие вещества выходили из частицы не воспламеняясь. В этом случае наблюдался кинетический режим горения – при относительно низкой температуре воздух проникал в межчастичное пространство

коксового остатка топливной гранулы, освобожденное от влаги и парогазов, и реагировал с коксом во всем объеме частиц.

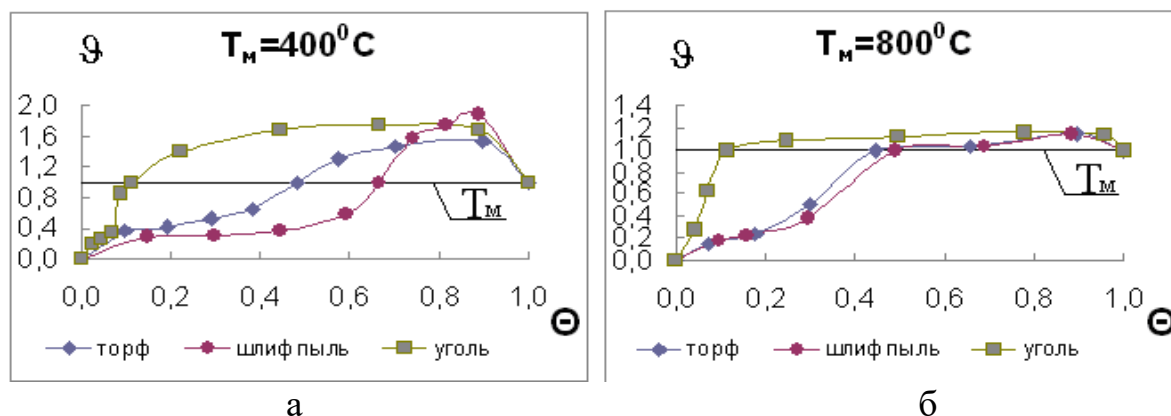


Рис. 3. Термограммы прогрева образца гранул
(по оси ординат - отношение температуры центра образца к температуре печи, $\Theta = T_{\text{ц}}/T_{\text{м}}$, по оси абсцисс – относительное время $\Theta = \tau_i / \tau$)

Перегревы центра частицы достигали при этом практически 100% относительно температуры муфеля. Длительность достижения центром частицы температуры печи составляет для угольной гранулы около 10% от времени горения, для гранулы из торфа – 50%, для гранулы из шлиф-пыли – 60%.

При температуре печи 800°C летучие вещества при выходе из гранулы вспыхивали и сгорали вокруг частицы. Оставшийся коксовый остаток выгорал в диффузионном режиме. Перегревы центра достигали 20% относительно температуры муфеля. Длительность достижения центром частицы температуры печи угольной гранулы менее 10% от всего времени горения, в грануле из торфа и шлифпыли – 40–50%.

С повышением температуры муфеля перегрев центра гранулы уменьшается, что связано с переходом горения частицы от кинетического к диффузионному режиму, а относительная длительность стадии горения коксового остатка растет.

Были проведены расчеты скоростей горения коксового остатка гранул. Определялись скорости горения коксового остатка в виде потока массы с единицы поверхности в единицу времени по соотношению

$$j = \frac{\Delta M}{\Delta \tau \cdot S},$$

где ΔM – масса коксового остатка, выгорающая за время $\Delta \tau$; S – геометрическая поверхность частицы по начальному размеру.

Если рассмотреть работы по выгоранию частиц, основанные на термометрии, то можно заметить, что большинство их основано на показаниях центральной термопары, дающей не представительный сигнал,

занижающий время горения коксового остатка, следовательно, увеличивающей скорости горения коксового остатка.

Процесс горения гранул (рис. 4) может быть разбит на три интервала:

1. Θ_1 – время достижения поверхностью T_m ;
2. Θ_2 – время с момента Θ_1 до достижения центром T_m ;
3. Θ_3 – время с момента Θ_2 до конца процесса.

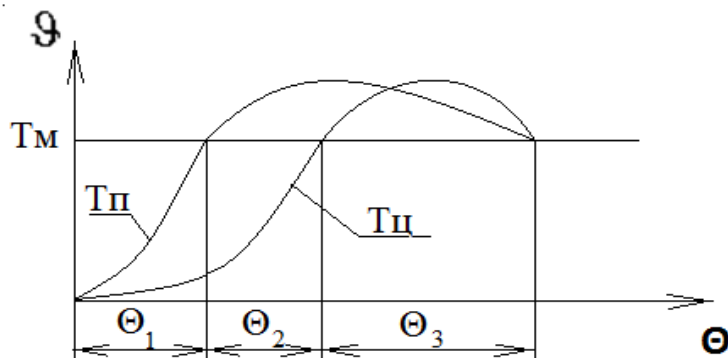


Рис. 4. Стадии горения гранулы

При определении времени выгорания коксового остатка необходимо учитывать не только показания центральной термопары, но и термопары, расположенной на поверхности, так как возникает разница во времени, равная периоду Θ_2 . Для сравнения на рис. 5 приведены зависимости скоростей горения гранул от температуры муфеля (T_m).

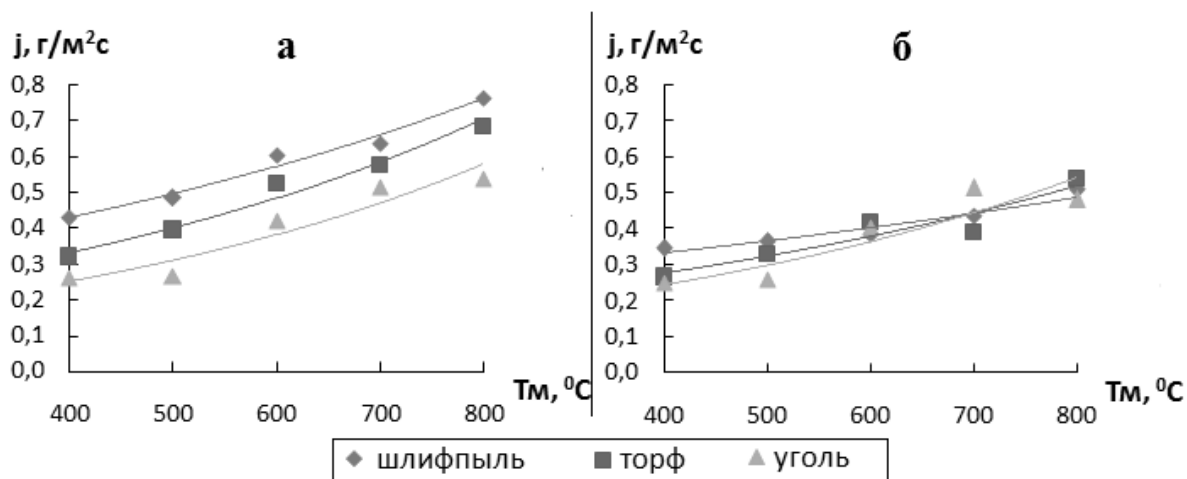


Рис. 5. Скорости горения коксового остатка в зависимости от T_m

На рис. 5а за время выгорания коксового остатка принято время, основанное на показаниях центральной термопары, т.е. время выгорания центра гранулы (Θ_3 – согласно рис. 4), на рис. 5б – время выгорания центра, но и поверхности гранулы ($\Theta_2 + \Theta_3$ – согласно рис. 4).

Проанализировав результаты эксперимента можно говорить о подтверждении известных закономерностей по угольному топливу, а также о необходимости особой термоподготовки топливных гранул биомассы, потому как стадия подготовки топлива занимает около половины времени сжигания.

При определении скорости горения гранул необходимо учитывать процессы, происходящие на поверхности частицы, так как при увеличении размеров частицы погрешности при определении длительности стадий горения могут значительно повлиять на результат.

Библиографический список

1. Усова, Г.И. Анализ сжигания топливных гранул / Г. И. Усова, О.И. Рыжков, В.Е. Силин, Т.Ф. Богатова // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2009. № 1. С. 107-108.
2. Каменецкий, Б.Я. Стадии горения полифракционного топлива в слое / Б.Я. Каменецкий // Теплоэнергетика. 2009. № 6. С. 60-62.
3. Кнорре, Г.Ф. Топочные процессы / Г.Ф. Кнорре. М.; Л.: ГЭИ, 1951.

Махаев А.Д., Баталов Н.Н., Рыжков А.Ф.

Уральский государственный технический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ КАРБОНАТНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА МЕТОДОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЛОЯ В СТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОВОМ РЕЖИМЕ

Генерация электрического тока в топливных элементах с расплавленным карбонатным электролитом (ТЭКЭ) осуществляется пористыми газодиффузионными электродами. Анодом в традиционном варианте служит пористый электрод из никеля или его сплавов, а катодом – пористый электрод из твердого раствора окиси лития в окиси никеля. Традиционный состав расплавленного электролита 62 моль % карбоната лития и 38 моль % карбоната калия с температурой плавления 488⁰С. Расплав загущен порошками оксидных соединений (в традиционном исполнении алюминатом лития), такая композиция называется матричным электролитом. Правильно подобранные параметры пористой структуры обоих электродов и матрицы не позволяют «затоплять» или «осушать» анод и катод, обеспечивая заполнение электродов расплавом по толщине примерно на 50%

таким образом, что вторая половина пористых электродов заполнена газами, которые диффундируют по «сухой» части пор к трехфазной границе, где происходят электрохимические процессы. Скорость электрохимических реакций, электропроводность электродов и электролита, скорость коррозии электродов зависят от температуры. Чаще всего рабочую температуру ТЭКЭ поддерживают на уровне $650 \pm 10^0 \text{C}$. Таким образом, важную роль приобретает поиск возможности прогнозирования распределения температуры и тепловых потоков в ТЭКЭ. Использование для этого математических моделей, изложенных в [1], затрудняется отсутствием достоверных экспериментальных данных для коэффициентов теплопроводности материалов топливного элемента.

В зависимости от характера изменения во времени температур и тепловых потоков в исследуемом образце в ходе рабочей стадии измерительного эксперимента различают стационарные и нестационарные методы измерения теплофизических свойств материалов. Теплопроводность можно измерить несколькими как стационарными, так и нестационарными методами. Среди них наиболее часто используются: стационарные методы плоского слоя и цилиндрического слоя, нестационарные методы нагретой проволоки и плоского мгновенного источника тепла. Последняя группа методов требует особых приемов нагрева проволоки или плоского источника тепла, что не позволяет непосредственно измерить теплопроводность, которую в этом случае можно рассчитать, если известны теплоемкость и плотность исследуемых материалов. В отличие от метода плоского слоя в методе цилиндрического слоя значительно слабее проявляются краевые эффекты, и нет необходимости изолировать нагреватель, чтобы создать направленный тепловой поток через слой исследуемого образца. При изготовлении цилиндрического слоя достигается высокая точность размеров. Имеются условия для хорошей герметизации прибора и проведения эксперимента в инертной атмосфере. Наконец, здесь есть возможность подавления конвекции и более строгого учета радиационного теплопереноса.

Для изготовления образцов анодного материала использовали смесь карбонильного и электролизного порошков никеля, с добавлением карбоната и оксалата никеля. Материал матрицы синтезировали, используя в качестве исходных веществ основания лития и алюминия, а материал катодов, используя карбонат лития и оксид никеля. Там, где это было необходимо, компоненты подвергали очистке. Пластические свойства в процессе механической обработки образцам придает масса, приготовленная из синтетического полимера и органического растворителя, которая разлагается в процессе термической обработки, в результате чего в образце формируется открытая пористость. Термическую обработку образцов из анодного материала проводили в атмосфере водорода, из матричного и катодного материала в атмосфере влажного углекислого газа. Смесь карбонатов лития и калия эвтектического состава готовили из чистых компонентов, сплавляя их в нужном соотношении при температуре выше температуры плавления наиболее тугоплавкого

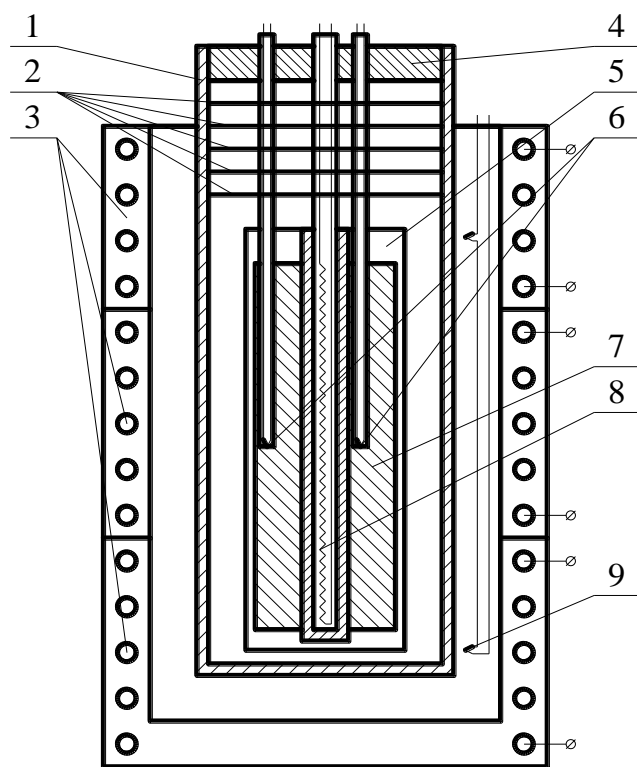


Рис. 1. Экспериментальная установка:
1 – пробирка из кварца; 2 – никелевые экраны; 3 – секции нагревательной печи; 4 – пробка; 5 – никелевый тигель; 6 – измерительные термопары; 7 – цилиндрический слой исследуемого материала; 8 – внутренний нагреватель; 9 – дифференциальная хромель-алюмелевая термопара

компонента. Затем ее подвергали тщательной очистке от влаги и других примесей, чтобы исключить образование продуктов их взаимодействия, которые могли бы повлиять на отражательную способность стенок измерительной ячейки, а также оптическую плотность расплава, другими словами, на изменение вклада радиационного переноса тепла в измеряемую на опыте величину суммарной теплопроводности.

На рис.1. схематически показано устройство экспериментальной установки. Размеры цилиндрического слоя подбирались так, чтобы свести к минимуму краевые эффекты и конвекцию расплава. Длина слоя была 80 мм, внешний диаметр 30 мм, а толщина его стенки 10 мм. Электрический нагреватель представлял собой фарфоровую трубку, обмотанную равномерно проволокой из нихрома диаметром 0,2 мм и располагался в цилиндрическом канале диамет-

ром 5 мм вдоль оси цилиндрического слоя. Чтобы исключить контакт обмотки с парами соли, разрушающими нихром, канал с нагревателем герметизировали. Температуру образца на расстоянии 1 мм от наружной и внутренней поверхностей цилиндрического слоя измеряли отградуированными хромель-алюмелевыми термопарами, холодные концы которых находились при 0⁰С в смеси воды со льдом, ЭДС термопар измеряли с помощью высокоточного потенциометра Р348. Термопары в двухканальной фарфоровой соломке помещали в каналы диаметром 3 мм, высверленные в цилиндрическом слое до половины его длины. Собранный таким путем прибор из цилиндрического слоя исследуемого материала с нагревателем и термопарами помещали в никелевый стакан, внутренним диаметром 30 мм. В сухом боксе в стакан загружали очищенную эвтектическую смесь в требуемом соотношении, стакан в свою очередь помещали в герметически закрываемую пробкой кварцевую пробирку. Пробирку эвакуировали, ее газовое пространство заполняли чистым аргонem и нагревали в печи до температуры плавления эвтектической смеси, которая заполняла поры цилиндрического слоя по всей его длине (слой расплава появлялся над верхним торцом образца). Пробку защищали от теплового излучения со стороны горячей части прибора экранами, которые также способствовали поддержанию необходимой зоны изотермического нагрева в рабочей части прибора. Пробирку нагревали в электрической печи сопротивления, позволяющую получить зону изотермического нагрева прибора протяженностью 120 мм. Для ее контроля использовали дифференциальную хромель-алюмелевую термопару, горячие спаи которой находились у внешней стенки прибора на расстоянии 120 мм друг от друга. Разность температур между ними во время эксперимента не превышала 0,1⁰С. Электропитание секций обмотки осуществляли автономно. Напряжение регулировалось автоматически с помощью высокоточных регуляторов температуры ВРТ-3, что позволяло поддерживать температуру при заданных значениях постоянной в пределах $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$. Для расчета теплопроводности необходимо более точно знать мощность нагревателя в каждом отдельном опыте. Она определялась по силе питающего постоянного тока, задаваемого источником питания Б5-21, и сопротивлению обмотки нагревателя, которое изменяется с температурой опыта. Силу питающего постоянного тока измеряли с помощью высокоточного прецизионного вольтметра Щ68000 по падению напряжения на образцовой катушке сопротивления класса точности 0,01, включенной последовательно в цепь питания нагревателя. Сопротивление обмотки нагревателя измеряли при комнатной температуре и вводили поправку на его возрастание с температурой в каждом отдельном опыте, полагая, что температурный коэффициент сопротивления используемого нихрома равен 0,0001 Ом/град в исследованных нами интервалах температур. Измерения не начинали до тех пор, пока заданная температура

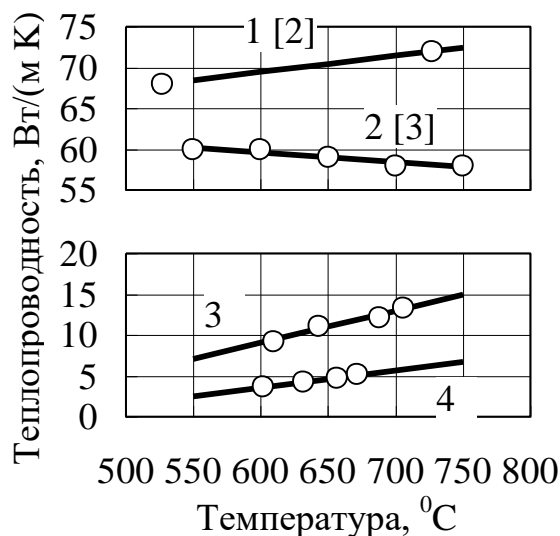


Рис. 2. Коэффициент теплопроводности: 1 – никель [2]; 2 – никель [3]; пористый никель ($\Pi = 60\%$); 3 – с расплавленным карбонатным электролитом, 4 – без электролита

не переставала изменяться во времени и не устанавливалась устойчивая изотермическая зона. Затем включали нагреватель и фиксировали изменение температуры внутренней и внешней поверхностей цилиндрического слоя. При установлении стационарного состояния измеряли разность температур. Искомые величины теплопроводности рассчитывали из результатов измерений градиентов температуры между внешней и внутренней поверхностями слоя в стационарном режиме и мощности нагревателя. Зависимость эффективной теплопроводности материала анода от температуры в диапазоне от 600 до 700⁰C приведена на рис. 2.

Библиографический список

1. Толмачев, Е.М. Методика расчета теплообмена в единичной ячейке батареи карбонатных топливных элементов при перекрестном питании электродов электроактивными газами / Е.М. Толмачев, А.Д. Махаев, А.Ф. Рыжков, Н.Н. Баталов // Материалы III Международной научно-практической конференции: Актуальные проблемы энергетики. Екатеринбург, 21-23 ноября 2007. С. 147-150.
2. Бабичев, А.П. Физические величины: справочник / А.П. Бабичев [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
3. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В.С. Чиркин. М.: Атомиздат, 1968. 484 с.

Макаров А.Н., Луговой Ю.А., Шевченко М.Н.

Тверской государственный технический университет

РАЦИОНАЛЬНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ПЛАЗМОТРОНОВ В ПЛАЗМЕННО-ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ С ЧЕТЫРЬМЯ ПЛАЗМОТРОНАМИ

Известна конструкция плазменно-дуговой печи с керамическим тиглем, питаемой постоянным током, с одним, реже несколькими вертикально расположенными в своде печи плазмотронами. Особенностью электрического режима работы таких печей является работа на длинных дугах 1,5–2,0 м для введения максимальной мощности дуг и обеспечения наибольшей производительности печи [1].

В начальном периоде плавки дуги, проплавляя колодцы, частично экранируются твердой шихтой. Известно, что значительную часть времени, даже в период расплавления, дуги плазмотронов горят, открыто излучая энергию на футеровку, поэтому основная часть теплоты в таких печах передается от дуг металлу не непосредственно, а путем отражения и вторичного излучения от футеровки, что приводит к перегреву футеровки. Перегрев футеровки ограничивает допустимую мощность, вводимую в печь.

Существуют конструкции плазменно-дуговых печей с керамическим тиглем и с тремя (или четырьмя) плазмотронами, установленными вертикально или наклонно под углом $40\text{--}55^\circ$ к ванне металла. Особенностью электрического режима работы таких печей является работа на коротких дугах до 0,5 м для ограничения перегрева футеровки печи вблизи мест ввода плазмотронов. Ограничение длины дуг в таких печах, необходимое для ограничения перегрева футеровки печи вблизи мест ввода плазмотронов, компенсируется количеством плазмотронов для увеличения вводимой мощности в печь [2].

Недостатком этих печей является нестабильность горения дуг в начальный период расплавления твердой шихты (из-за ее обвалов), колебания напряжения и повышенный шум, а также не очень высокий коэффициент полезного действия ПДСП.

Авторы статьи предлагают решить задачу путём увеличения излучения дуги на металл и снижения на стены и свод печи. Решение поставленной задачи можно достичь следующим образом.

Плавление стали в плазменно-дуговой печи предусматривает вначале плавление шихты на постоянном токе вертикальным плазмотроном, расположенным в своде печи. Это обеспечивает устойчивое положение шихты, равномерность ее нагрева, в результате чего шихта оседает, не теряя своей естественной устойчивости, что приводит к стабильности

горения дуги и стабильности электрического режима работы печи. Угловой коэффициент излучения (УКИ) вертикальной дуги на металл в период расплавления шихты снижается с 0,93 в начале плавки до 0,38 к окончанию расплавления шихты.

После расплавления шихты дальнейшую плавку осуществляют тремя наклонно установленными плазмотронами, каждый из которых расположен в стене печи под углом $15-30^{\circ}$ к ванне металла, при этом во все периоды плавки отношение длины дуги к диаметру ванны составляет 0,7–0,85. Это увеличивает коэффициент излучения дуги на ванну металла до 0,52, что приводит к большей скорости нагрева металла, повышению производительности печи и, как следствие, к сокращению удельного расхода электроэнергии. Для сравнения при той же длине дуги, но вертикальном расположении по центру плавильного пространства печи величина среднего суммарного УКИ составляет 0,38. КПД дуг повышается на 12%, а удельный расход электроэнергии сокращается не менее чем на 15–20%.

Чем ближе расположение плазменных дуг к ванне металла, тем больше угловой коэффициент на ванну металла и тем выше КПД дуг. Однако приближение плазмотронов к поверхности ванны металла приводит к чрезмерному нагреву активной поверхности плазмотронов и увеличению вероятности разрушения плазмотронов за счет попадания брызг и паров расплавляемого металла. Поэтому наклонять плазменные дуги на угол меньше 15° к ванне металла нецелесообразно.

При угле наклона плазмотрона больше 30° энергия большей частью будет расходоваться на нагрев стен и свода печи.

Таким образом, наиболее оптимальный режим работы плазменно-дуговой печи характеризуется ведением плавки на постоянном токе первоначально вертикальным плазмотроном, расположенным в своде печи, а после расплавления 30–40% шихты плавки на постоянном токе тремя наклонными плазмотронами, каждый из которых расположен в стене печи под углом $15-30^{\circ}$ к ванне металла, при этом отношение длины дуги к диаметру ванны во все периоды плавки составляет 0,7–0,85.

Библиографический список

1. Никольский, Л.Е. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей / Л.Е. Никольский, В.Д. Смоляренко, Л.Н. Кузнецов. М.: Металлургия, 1981. С. 10-13; 19-31.
2. Бортничук Н.И., Плазменно-дуговые плавильные печи / Н.И. Борт, М.М. Крутянский. М.: Энергоиздат, 1981. С. 87-93.

Кувалдин А.Б., Пунанов Р.В., Курнешов А.А.
Московский энергетический институт (технический университет)

ВЫБОР СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОНАГРЕВА ДЛЯ ГАЗОСТАТА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Газостаты высокого давления предназначены для горячего изостатического прессования (ГИП), т.е. для обработки разнообразного сырья и готовых изделий при высоких температурах и давлении в рабочей среде с контролируемым химическим составом. Газостаты находят применение в самых разных областях промышленности, а также в медицине и космических технологиях. Среди технологических процессов, проводимых в газостатах, можно назвать:

- получение наноматериалов с повышенными по сравнению с традиционными материалами характеристиками твердости, прочности;
- залечивание усталостных повреждений в деталях;
- изготовление деталей сложной формы из порошковых материалов;
- химическая обработка керамики;
- изготовление оптических линз с улучшенными характеристиками.

В зависимости от целей проведения процесса давление и температура в современной аппаратуре ГИП могут достигать 200 МПа и 2000°C соответственно, а для специальных применений разработано оборудование, которое позволяет создавать в рабочем объеме температуры до 3000°C и давление до 300 МПа. Конструктивные особенности газостатов зависят от назначения, размеров и конкретных условий эксплуатации. Среди материалов, подвергающихся термобарической обработке в газостатах, есть как металлы и их сплавы, так и керамика, пластмассы, полиэтилен и многие другие. Температуры обработки и величины рабочего давления для разных материалов различны. Так, для изготовления деталей из металлических порошков или обработки готовых изделий из железа, стали, титана и других металлов и сплавов требуются температуры более 1000°C. Например, для обработки деталей из титана или изготовления изделий из титанового порошка требуется нагрев до температуры 1250°C и давление 160 МПа. При этом плотность обработанного материала повышается до 98–100% от значения теоретической плотности материала. Другие технологические процессы требуют гораздо меньшие температуры нагрева. К таким относятся получение изделий из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (220°C; 30 МПа) и выщелачивание литейных керамических стержней из полостей турбинных лопаток (420°C; 26 МПа).

Из-за широкого диапазона рабочих температур и давления в газостатах к системам электронагрева в них предъявляется ряд специфических требований, к которым, в частности, относятся

возможность достижения указанных температур, надежность работы при высоком давлении, небольшие габаритные размеры, что определяется ограниченным рабочим объемом газостата, возможность регулирования мощности нагрева и др. В газостатах высокого давления применяются три типа систем электронагрева, а именно: резистивные, индукционные и комбинированные, индукционно-резистивные нагревательные системы [1]. Конструкции газостатов с использованием вышеуказанных систем электронагрева в общем виде представлены на рис. 1 а, б.

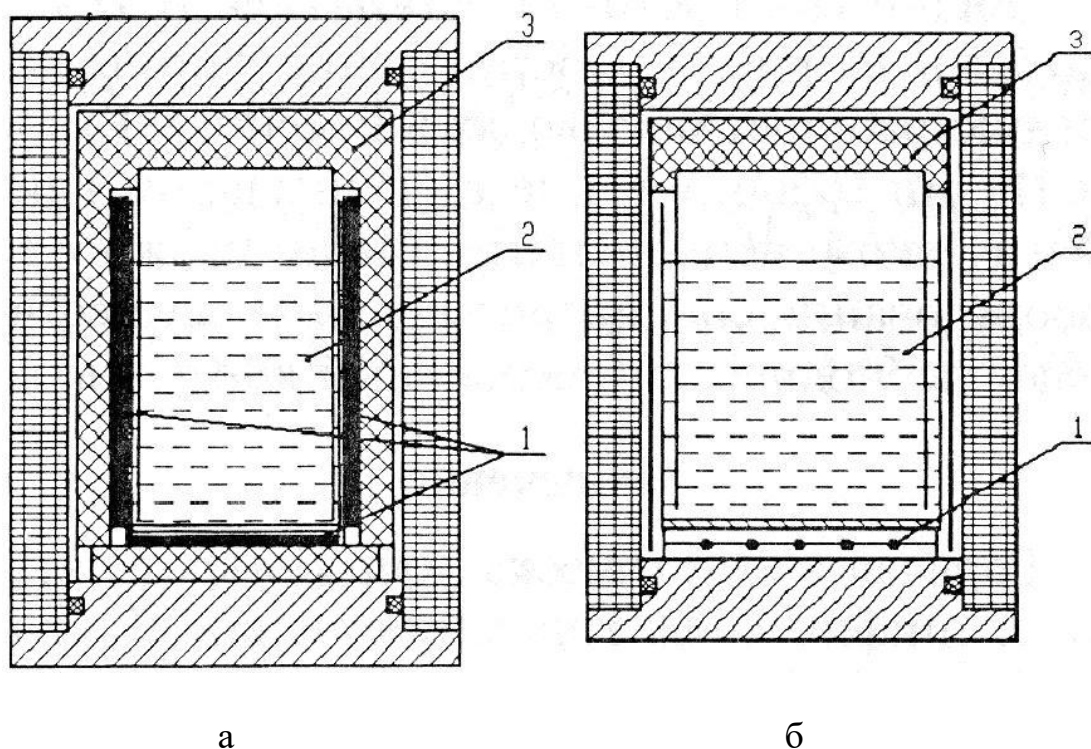


Рис. 1. Расположение нагревателей в газостатах с использованием:
 а – резистивного; б – индукционного и
 индукционно-резистивного нагрева:
 1 – нагреватель; 2 – рабочий сосуд; 3 – теплоизоляция

Резистивные нагреватели изготавливаются из тугоплавких материалов в виде листов с разрезами специальной формы, которые могут быть согнуты в трубу (рис. 2). Одним из самых перспективных материалов для высокотемпературных резистивных нагревателей в газостатах является углерод-углеродный композит (УУКМ). Нагреватели из листов УУКМ способны нагреваться до 2000–2500°C, сохранять форму и работоспособность при давлении от вакуума до 300 МПа и выше, и при этом нечувствительны к резким колебаниям температуры и давления. Основной резистивный нагреватель имеет цилиндрическую форму и располагается вдоль стенки рабочего сосуда. При необходимости в торцевых частях установки могут располагаться дополнительные резистивные нагреватели, выполненные в виде диска с прорезями

специальной формы, аналогичными основному резистивному нагревателю. Высокие значения температуры и давления создают определенные сложности с устройством теплоизоляции и сохранением герметичности корпуса газостата. Другой проблемой создания таких нагревателей являются локальные перегревы, что может привести к сокращению срока службы. Однако только резистивные нагреватели позволяют достигать указанных высоких значений температуры нагрева и равномерности распределения температур по высоте рабочей емкости газостата.

Индукционные и индукционно-резистивные нагревательные системы могут применяться при температурах нагрева до 800°C и давлении до 200 МПа. Индуктор чаще всего выполняется из меди в виде плоской спиральной катушки с

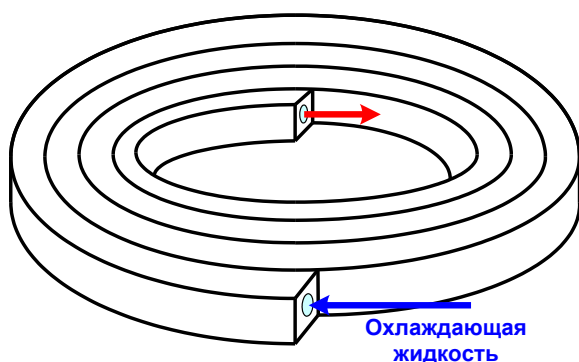


Рис. 3. Эскиз плоского водоохлаждаемого индуктора

использованием принудительного жидкостного охлаждения (рис. 3) и устанавливается в донной части рабочей камеры, под дном реактора. Но при высоких давлениях требуется применение специальных мер для обеспечения механической прочности нагревателя, что усложняет и удорожает всю конструкцию.

Преимущество индукционного нагревателя перед резистивным заключается в значительно большей удельной мощности ($150\text{--}200\text{ кВт/м}^2$ против $20\text{--}50\text{ кВт/м}^2$), выделяющейся на поверхности рабочей емкости, и снижении тепловых потерь от нагревателя, поскольку температура индуктора значительно ниже температуры резистивного нагревателя при равных температурах нагрева загрузки. Кроме того, индукционная нагревательная система создает значительно больший, чем резистивные нагреватели, градиент температур по высоте рабочей камеры, что требуется для целого ряда технологических процессов.

Индукционно-резистивные нагревательные системы конструктивно отличаются от индукционных систем отсутствием системы охлаждения индуктора. Сплошной в сечении профиль индуктора позволяет применять

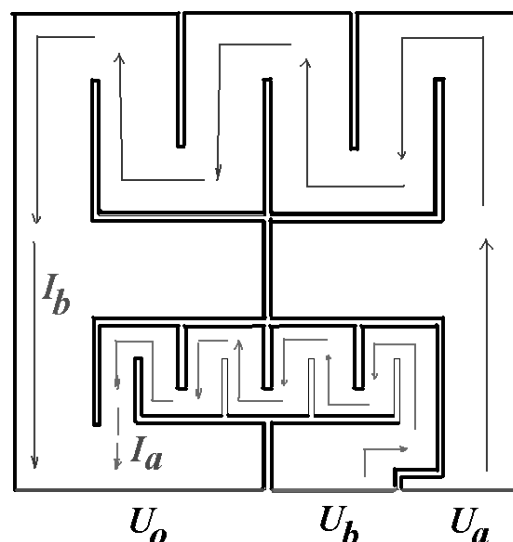


Рис. 2. Эскиз резистивного двухфазного нагревателя из листа УУКМ

его практически при любом давлении из рабочего диапазона без использования специальных мер для обеспечения механической прочности нагревателя. При этом тепловой поток от горячего индуктора может быть использован для нагрева реактора, что улучшает тепловой баланс установки [2]. Недостатком индукционно-резистивной нагревательной системы по сравнению с индукционной является меньшая температура нагрева. При температурах, превышающих 450–500°C, на поверхности медного индуктора происходит процесс формирования окарины, имеющей большее значение электрического сопротивления, что приводит к локальным перегревам и снижению срока эксплуатации индукционно-резистивного нагревателя. Для решения этой проблемы на поверхность индуктора может быть нанесен защитный слой никеля или хрома. Эта мера, хотя и увеличивает стоимость индукционно-резистивного нагревателя, позволяет увеличить температуру его нагрева.

Выводы

1. Выбор системы электронагрева газостата зависит от целого ряда факторов, основным из которых являются технологические требования.
2. Системы резистивного нагрева целесообразно применять при температурах нагрева, превышающих 800°C, и значениях удельной мощности в нагреваемой емкости до 50 кВт/м² либо в случае необходимости равномерного прогрева загрузки газостата по высоте.
3. Системы индукционного и индукционно-резистивного нагрева целесообразно применять при больших значениях удельной мощности до 200 кВт/м² и температурах нагрева до 800°C, а также в тех случаях, когда равномерность прогрева по высоте загрузки газостата неважна либо вредна.
4. Системы индукционно-резистивного нагрева, в целом, проще и выгоднее индукционных систем как в экономическом, так и в энергетическом плане.

Библиографический список

1. Кувалдин А.Б. Газостаты с электронагревом: применение, особенности конструкции и основные характеристики / А.Б. Кувалдин, М.А. Судинин // Электromеталлургия. № 1. 2007. С. 15-20.
2. Пунанов, Р.В. Использование тепловых потерь индуктора для дополнительного нагрева изделий в газостатах / Р.В. Пунанов, М.А. Судинин // Труды XII Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» МКЭЭЭ-2008. М: Изд-во ГОУВПО МЭИ (ТУ). Ч. 2. 2008.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ОТ МОДУЛЕЙ ПЕЛЬТЬЕ В КАМЕРЕ ВЛАГОУДАЛЕНИЯ

Сушилки конденсационного типа (рис.1) состоят из камеры и системы влагоудаления. Нагрев воздуха происходит при помощи ТЭНов. Центробежные вентиляторы осуществляют циркуляцию воздуха сквозь влажный объект, при этом влага, содержащаяся в верхних слоях объекта, переходит в воздух. Далее насыщенный воздух попадает в систему влагоудаления, где влага частично конденсируется на внутреннем теплообменнике и отводится в канализацию, а осушенный воздух возвращается в камеру. Таким образом, в отличие от конвективных камер, нагретый воздух не выбрасывается наружу, а продолжает циркулировать в камере [1].

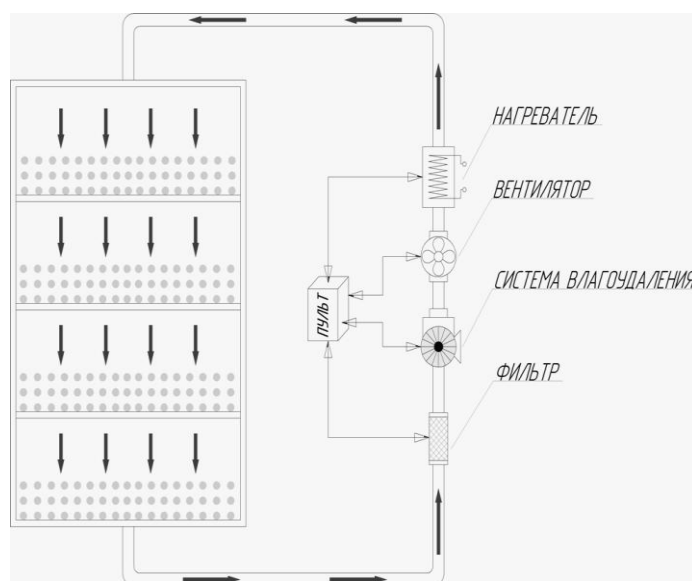


Рис. 1. Сушилка конденсационного типа

Система влагоудаления традиционно использует парокомпрессионный метод конденсации влаги, но при средних мощностях сушилки имеется возможность использовать для этого термоэлектрические модули, использующие в своей работе эффект Пельтье.

Термоэлектрический эффект был открыт в 1834 году французским физиком Жаном Пельтье, который обнаружил, что при протекании постоянного тока через контакт двух разнородных полупроводников р- и n-типа на контакте выделяется или поглощается тепло, именуемое теплом

Пельтье, в зависимости от направления тока. Этот процесс описывается следующей зависимостью:

$$dQ = \alpha \cdot T \cdot I \cdot dt, \quad (1)$$

где Q – тепло Пельтье, Дж; α – коэффициент термо-ЭДС, В/К; T – температура контакта, К; I – сила тока, проходящего через контакт полупроводников, А; t – время протекания тока, с.

Термоэлектрический модуль (ТЭМ) – это термоэлектрический холодильник, состоящий из последовательно соединенных полупроводников р- и n-типа, образующих р-n- и n-p-переходы. Каждый из таких переходов имеет тепловой контакт с одним из двух радиаторов. В результате прохождения электрического тока определенной полярности образуется перепад температур между радиаторами модуля Пельтье: один радиатор работает как холодильник, другой нагревается и служит для отвода тепла. Помещенные холодными сторонами внутрь теплообменника термоэлектрические модули выступают как тепловые насосы, перекачивая тепло от нагретого влажного воздуха на горячие стороны модулей, охлаждаемые любым из известных методов. Уравнение, описывающее тепловой баланс на холодной стороне термоэлектрического модуля, имеет вид [2]:

$$\alpha \cdot I \cdot T_0 - R \cdot I^2 - k \cdot \Delta T = Q_0, \quad (2)$$

где I – ток, протекающий через ТЭМ, А; T_0 – температура холодной стороны ТЭМ, К; R – сопротивление ТЭМ, Ом; k – теплопроводность ТЭМ, Вт/К; $\Delta T = T - T_0$ – разность температур на сторонах ТЭМ, К; T – температура горячей стороны ТЭМ, К; Q_0 – тепловая нагрузка на ТЭМ, Вт.

Если температура на холодных сторонах термоэлементов будет ниже температуры точки росы, то процесс конденсации влаги будет проходить быстрее, при этом уменьшится время сушки и повысится производительность установки.

Распределение температурного поля в системе влагоудаления представлено на рис. 2. Температура воздуха 50°C, влажность воздуха 16%, температура холодной стороны термоэлементов 4°C. Из рисунка видно, что максимальная температура воздуха и радиатора составляет 19°C, что ниже температуры точки росы при данной температуре и влажности воздуха. Это говорит о том, что процесс конденсации влаги происходит по всей поверхности теплообменника.

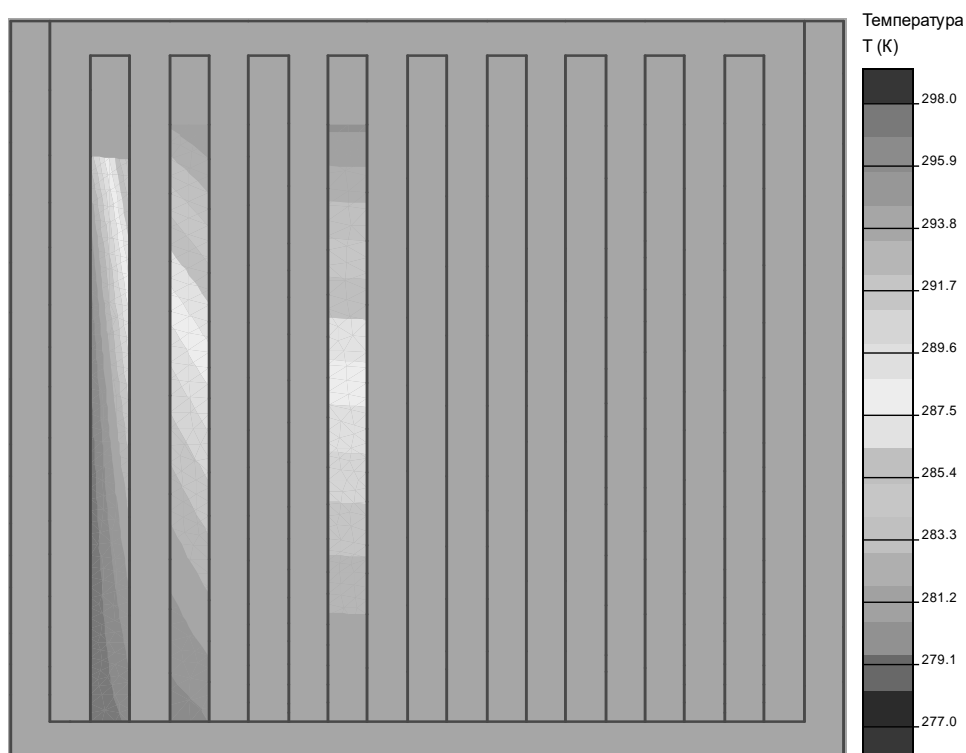


Рис. 2. Распределение температурного поля в системе влагоудаления

Преимущества такого метода удаления влаги [3]:

1. Отсутствие движущихся, изнашивающихся частей, рабочих жидкостей и газов. Роль рабочего вещества в термоэлектрическом холодильнике играют электронный и дырочный газ полупроводника.
2. Практически неограниченный ресурс работы как следствие отсутствия движущихся частей и обычных рабочих веществ.
3. Бесшумность работы термоэлектрического блока, что также является следствием п. 1
4. Габариты термоэлектрического охладителя могут быть сколь угодно малыми. Важно подчеркнуть, что холодильный коэффициент термоэлектрического холодильника практически не зависит от его размеров вплоть до сотен микрон.
5. Малая инерционность холодильника, что непосредственно связано с его малыми габаритами.
6. Произвольная ориентация в пространстве и поле тяготения, устойчивость к динамическим и статическим перегрузкам.
7. Возможность плавного и точного регулирования холодопроизводительности и температурного режима.
8. Конструктивная пластичность.
9. Возможность построения холодильника практически любой мощности.

Библиографический список

1. Бакластов, А.М. Проектирование, монтаж и эксплуатация тепломассообменных установок: учеб. пособие для вузов / А.М. Бакластов, В.А. Горбенко, П.Г. Удыма; под ред. А.М. Бакластова. М.: Энергоиздат, 1981. 336 с., ил.
2. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: справочник / Л.И. Анатычук. Киев: Наукова думка, 1979. 768с.
3. Булат, Л.П. Термоэлектрическое охлаждение: текст лекций / Л.П. Булат и др.]; под общ. ред. Л.П. Булата. СПб.: СПбГУНиПТ, 2002. 147 с.

Кондрашов В.П., Колыванов С.Ю., Сапрыкин А.И., Лыков А.Г.,
Савалык Н.А., Погребисский М.Я.

Московский энергетический институт (технический университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РУДНО-ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Производство ферросплавов и других видов продукции черной и цветной металлургии в рудно-термических электропечах (РТП) весьма энергоемко, поэтому даже небольшое сокращение затрат энергии приводит к значительному технико-экономическому эффекту, особенно в условиях роста стоимости электроэнергии.

Представляется весьма актуальной разработка методики, аппаратных и программных средств, предназначенных для выполнения на действующих печах исследований с целью определения оптимальных по технико-экономическим показателям режимов работы.

Выбор таких режимов РТП представляет собой многофакторную задачу, в которой выходные показатели (производительность печи, удельный расход электроэнергии, выход ведущего элемента и др.) зависят от большого количества влияющих факторов, к которым относятся характеристики шихтовых материалов (химический состав, размер фракции, влажность по каждому из компонентов шихты), электрический режим, включая заглубление электродов в ванну печи, и т.д.

В то же время построение математической модели, устанавливающей детерминированную зависимость между входными и выходными параметрами технологического процесса в РТП, аналитическими и даже численными методами практически невозможно вследствие многофакторности задачи математического описания РТП, вероятностного характера многих процессов, распределенности параметров.

Наиболее целесообразно математическое описание технологического процесса в РТП в виде регрессионной модели, то есть модели, построенной по результатам технологического эксперимента. На основе регрессионной модели строится автоматизированная система управления (АСУ) технологическим процессом в РТП.

Работы по созданию, испытанию и внедрению такой системы проводятся в настоящее время на Тихвинском ферросплавном заводе (ЗАО «ТФЗ») на печи РКО-16,5ФХм для производства углеродистого феррохрома. В состав АСУ, в частности, входит автоматизированный программно-аппаратный комплекс для экспериментального определения электрических характеристик печи и контроля состояния футеровки.

Анализ электрических характеристик печи [1], рассчитанных на основе измерений основных параметров (индуктивных и активных сопротивлений) печного контура на действующей печи, является традиционным способом определения оптимального по технико-экономическим показателям режима ведения технологического процесса. Для измерения параметров печного контура используются электроанализаторы CVM-NRG96 и программируемый анализатор электропотребления AR-5, позволяющие накапливать информацию в предписанном формате и передавать ее на компьютер с обработкой по заданной программе в режиме реального времени. Одновременное подключение трех электроанализаторов – на сторонах высокого и низкого напряжения печного трансформатора, а также к электродам печи – позволяет определить электрические параметры печи как в целом по печному контуру, так и отдельно для ванны, короткой сети и печного трансформатора. При необходимости можно выделить отдельные участки короткой сети.

Составлен алгоритм расчета электрических характеристик печи в ходе ее работы по ступеням напряжения печного трансформатора с учетом изменений индуктивного и активного сопротивления токоподвода и всего печного контура.

Полученное таким образом семейство зависимостей активной мощности от тока электрода $P_{акт}=f(I)$ для разных ступеней напряжения питающего трансформатора представлено на рис. 1. Линия максимальных мощностей ABC, проведенная через максимумы этих кривых, не учитывает характеристик печного трансформатора и допустимых значений его тока по ступеням напряжения. Линия максимальных мощностей ABD учитывает допустимые значения тока трансформатора, но при этом не принимаются во внимание технологические параметры процесса.

Технологические условия, которые необходимо учитывать при выборе рациональных режимов эксплуатации, а также оценка соответствия основных параметров печи (электрических и геометрических) ее мощности могут быть получены из рассмотрения печей-аналогов, на которых при тех же процессах достигаются высокие технико-экономические показатели.

Расчет параметров исследуемой печи выполняется при этом на основе теории подобия. Полученный таким способом электротехнологический режим (точка Е) наносится на семейство кривых (рис. 1), и появляется возможность выбора рационального электрического режима ведения процесса на данной печи.

Более точно выбор электрического режима выполняется не по активной, а по полезной мощности $P_{пол}$, максимум которой не совпадает с максимумом активной мощности (достигается при меньшем значении тока). Так как ход процесса в ванне печи определяется полезной мощностью, именно ее максимум нужно поддерживать при регулировании электрического режима. Зависимости $P_{пол}=f(I)$ для разных ступеней напряжения печного трансформатора представлены на рис. 2. Линия BCD представляет собой линию максимальных полезных мощностей по электрическим характеристикам, а линия ACD – то же, но с поправкой на допустимые токи печных трансформаторов для каждой из ступеней. Зона левее линии ACD – рабочая зона, а работа на режимах правее этой линии нецелесообразна, поскольку дальнейшее увеличение тока электродов ведет к снижению полезной мощности.

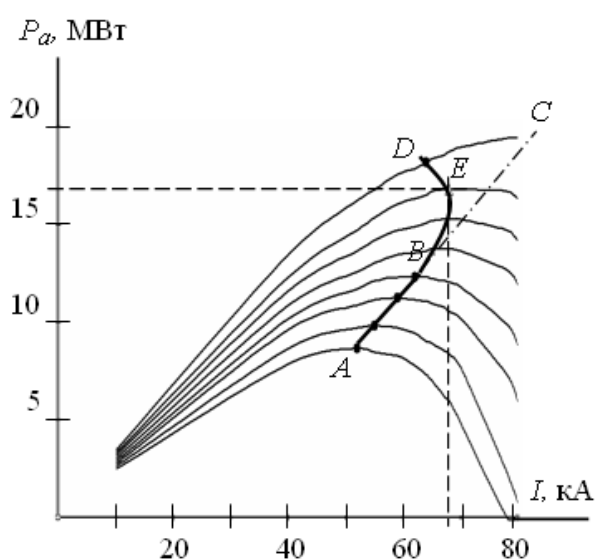


Рис. 1. Выбор электрического режима по графикам активной мощности

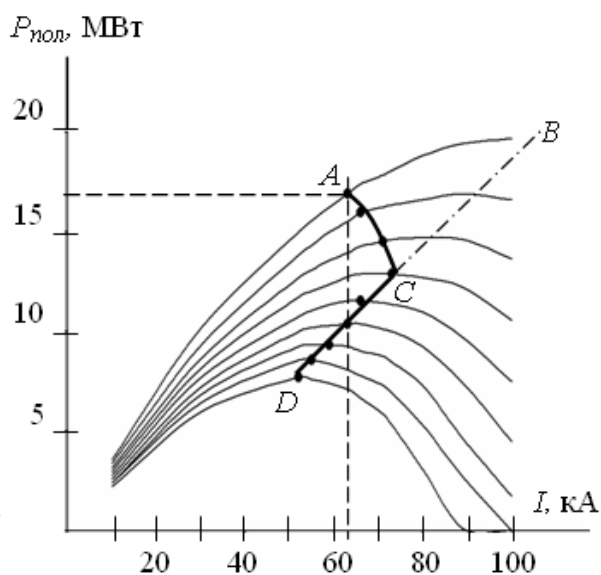


Рис. 2. Выбор электрического режима по графикам полезной мощности

В ходе эксплуатации печи также осуществляются непрерывный контроль температур футеровки с использованием замурованных термопар, замеры скорости и температуры воздуха в каналах охлаждения подины, расхода и температуры воды, охлаждающей элементы конструкции, и периодическое обследование наружной поверхности футеровки тепловизором TESTO-880. Результаты этих тепловых измерений автоматически передаются на компьютер и используются при поиске путей снижения тепловых потерь, а также для диагностики

состояния футеровки. В целях контроля состояния футеровки по результатам измерений рассчитывается в автоматическом режиме тепловой поток через футеровку и затем температурное поле в футеровке с учетом образования гарнисажного слоя у внутренней поверхности футеровки. Контролируются условия неперевышения допустимых температур для каждого слоя футеровки, а также наличие и необходимая толщина гарнисажного слоя. В случае несоблюдения хотя бы одного из условий формируется предупредительный сигнал с обозначением места и величины отклонения температуры от допустимого значения.

Учитывая многообразие факторов, влияющих на производительность РТП, удельный расход электроэнергии и т.п., наиболее эффективным средством достижения высоких технико-экономических показателей работы печи является компьютерная обработка массива данных, характеризующих технологический процесс, на основе методов регрессионного анализа и математической статистики [2].

Массив данных формируется в ходе пассивного либо активного эксперимента на печи частично автоматическим путем регистрации измеренных значений параметров, частично путем ручного ввода (технологические параметры). Данные автоматически анализируются с целью отбраковки заведомо искаженных и ненадежных данных. Возможно формирование массива данных как в шаговом режиме (для фиксированных моментов времени), так и с усреднением за определенный период.

Подготовленный массив данных обрабатывается с помощью специально разработанной программы регрессионного анализа. Результатом обработки является получение коэффициентов уравнения регрессии, связывающего значения каждого из выходных показателей Y_j с входными параметрами $x_1, x_2 \dots x_n$. Уравнение регрессии строится в виде полинома не ниже 2-го порядка:

$$Y_j = a_1x_1^2 + a_2x_2^2 + \dots + a_nx_n^2 + a_{11}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{nn}x_n + a_0. \quad (1)$$

После исключения малозначимых входных параметров получают уравнение регрессии для интегрального показателя качества ПК путем сложения уравнений регрессии для различных технико-экономических показателей с разными весовыми коэффициентами. Интегральный показатель качества может быть равен, например,

$$ПК = K_1 \cdot Q + K_2 \cdot W_{y\partial}, \quad (2)$$

где Q – производительность печи, т/сутки; $W_{y\partial}$ – удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т; K_1, K_2 – весовые коэффициенты, назначаемые путем экспертной оценки.

Полученная взаимосвязь входных параметров и интегрального показателя качества (поверхность отклика) исследуется на экстремум, в результате чего определяется сочетание входных параметров, при которых

достигается наибольшее значение интегрального показателя качества в данных технологических условиях.

Общий ожидаемый прирост технико-экономических показателей после использования всех возможностей оптимизации режима работы печи (снижение тепловых потерь, ведение процесса по максимуму полезной мощности и выбор оптимального электротехнологического режима на основании регрессионного анализа) лежит в пределах 5 – 17%.

Библиографический список

1. Данцис, Я.Б. Методы электрических расчетов рудно-термических печей / Я.Б. Данцис. Л.: Энергия, 1973.
2. Вучков, И. Прикладной линейный регрессионный анализ / И. Вучков, Л. Бояджиева, Е. Солаков. М.: Финансы и статистика, 1987.

Елизаров К.А.

Московский энергетический институт (технический университет)

СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА МОЩНОСТИ ДУГОВОЙ ПЕЧИ С УЛУЧШЕННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ

Дуговые печи (ДП) применяются для широкого спектра технологических процессов от плавки черных металлов и сплавов до получения ферросплавов и расплавления материалов, неэлектропроводных в твердом состоянии.

Производительность дуговой печи в значительной степени зависит от характеристик привода перемещения электрода, который в основном выполняется электромеханическим (для печей малой ёмкости) или гидравлическим (для печей большой ёмкости).

Такие преимущества гидравлического привода, как компактность, наименьшее по сравнению с другими видами приводов отношение массы к развиваемой мощности, способность длительно развивать статические усилия, возможность бесступенчатого регулирования скорости в широком диапазоне, возможность защиты от перегрузок ограничением давления, плавность и бесшумность работы, приводят к все более широкому использованию электрогидравлических приводов [1]. Создание в последнее время надежных пропорциональных гидрораспределителей обеспечивает возможность регулирования скорости перемещения рабочих органов с диапазоном регулирования 10 000 и выше, что позволяет реали-

зовать различные алгоритмы работы регуляторов перемещения электродов. Недостатки гидравлического привода обусловлены утечками рабочей жидкости через уплотнения и зазоры (особенно при высоких значениях давления), нагревом рабочей жидкости, что в ряде случаев требует применения специальных охлаждающих устройств и средств тепловой защиты и приводит к более низкому КПД, чем у сопоставимых механических передач, необходимостью обеспечения в процессе эксплуатации чистоты рабочей жидкости и защиты от проникновения в неё воздуха, пожароопасностью (при применении горючей рабочей жидкости). Влияние вышеперечисленных недостатков на работу машин и механизмов ликвидируют рациональным выбором гидравлических схем и конструированием гидроузлов. Это подтверждается зарубежными разработками [2].

Перспективным можно считать применение гидравлического привода для перемещения электродов дуговой печи, что позволяет упростить кинематическую схему механизма перемещения электрода и значительно повысить быстродействие [3].

Регуляторы мощности ДП имеют относительно простую кинематику, однако они характеризуются нелинейностями и разноплановым характером связей, затрудняющих определение параметров регуляторов [4]. Знание параметров кинематической цепи, оказывающей существенное влияние на быстродействие и качество регулирования, позволяет построить модель системы управления, адекватно отражающую ее свойства.

Быстродействие и качество регулирования в свою очередь оказывают существенное влияние на энергопотребление.

Период расплавления (наиболее энергоемкий из периодов плавки) предполагает особенное повышение быстродействия регулятора при ликвидации последствий обрыва дуги и эксплуатационных коротких замыканий. Так, например, в течение периода расплавления возможно более десятка эксплуатационных коротких замыканий и обрывов дуги. Это приводит, с одной стороны, к снижению мощности, выделяемой в дуге и увеличению длительности периода расплавления, а с другой – увеличивает потери энергии. Это обусловлено необходимостью компенсации энергии, потерянной при перерывах горения дуги в виде дополнительных тепловых потерь, что приводит к завышению расхода электрической энергии на тонну расплавляемого металла.

Для повышения быстродействия регулятора и качества регулирования необходимо увеличивать скорости перемещения электродов. При этом в последнее время вместо применявшихся ранее скоростей перемещения электрода 1,25 – 6 м/мин, начинают применять скорости перемещения электрода до 10 м/мин, а в отдельных случаях и до 15 м/мин. Соответственно возрастают и динамические усилия в элементах

регулятора (стойках, электрододержателях и т.д.) при разбеге и торможении. По этой причине при перемещении возникает заметное отставание конца рукава электрода от точки приложения силы (точка приложения штока гидропривода), что вызывает упругие деформации и колебания рукавов электрододержателей, особенно сильно это сказывается на печах большой емкости. Дополнительное воздействие вносится системой гидравлического привода перемещения электродов из-за возникновения гидравлических колебаний в трубопроводах и гидроцилиндрах печи. Практика эксплуатации ДП с гидравлическими приводами показала, что из-за инерции жидкости, подвижных частей и упругости гидромеханических элементов переходной процесс следящих гидроприводов сопровождаются автоколебаниями, приводящими к увеличению дисперсии, продолжительности плавки, расхода электроэнергии и электродов и к снижению производительности печи, коэффициента электрической мощности, вводимой в печь. Кроме того, при автоколебаниях может возникать большой динамический выброс, в результате происходит непосредственное столкновение электродов с металлом, создающее короткие замыкания, а обрыв дуги может приводить к поломке электрода.

Актуальными вопросами являются улучшение работоспособности и совершенствования дуговых печей, создание механизма перемещения электродов с высоким быстродействием и устойчивостью против автоколебаний. Решить эти вопросы можно проведением аналитических исследований динамических характеристик следящих гидроприводов механизма перемещения электродов [5].

При разработке систем управления дуговыми электропечами нередко возникает вопрос получения адекватной модели дуговой печи, в частности привода перемещения электродами, который оказывает существенное влияние на скорость, точность и устойчивость работы системы управления печью.

Трудности настройки системы управления перемещением электродов с исполнительным гидравлическим приводом обусловлены наличием элементов с нелинейными характеристиками. Такими элементами являются гидравлический распределитель, напорная магистраль, стойка электрододержателя.

В качестве модели электрогидравлического регулятора мощности была предложена модель, основанная на серии экспериментов по определению параметров кинематической цепи. Эксперименты проводились на действующей 12-тонной печи постоянного тока [6]. В ходе исследований измерялись колебания электрода и электрододержателя при различных режимах работы печи, динамические характеристики гидравлического оборудования.

На основе экспериментальных данных была уточнена и дополнена

традиционная модель гидравлического привода, что позволило произвести более полный анализ его работы. Было получено, что гидравлический привод является существенно нелинейным и обладает нелинейным коэффициентом усиления. Кроме этого, предложено использовать дополнительную обратную связь по скорости, что позволяет улучшить динамические характеристики привода. На основании сделанных выводов в работе был предложен адаптивный привод перемещения электродов.

В ходе исследований была отмечена нелинейная зависимость колебаний электрододержателя и электрода дуговой печи от скорости перемещения электрода и определена уточненная экспериментальная модель стойки, электрододержателя и электрода, учитывающая нелинейности и колебательный характер.

При совместном анализе механической и гидравлической частей системы была произведена более точная настройка регулятора мощности дуговой печи, который было предложено выполнить с адаптацией по скорости перемещения электрода.

Использование полученного регулятора позволило повысить точность регулирования, улучшить быстродействие системы и качество переходных процессов зажигания дуги и ликвидировать короткие замыкания, что привело к уменьшению энергопотребления печи и позволило вести плавку более энергоэффективно.

На регулятор мощности дуговой сталеплавильной печи с адаптацией по скорости был получен патент на полезную модель.

Библиографический список

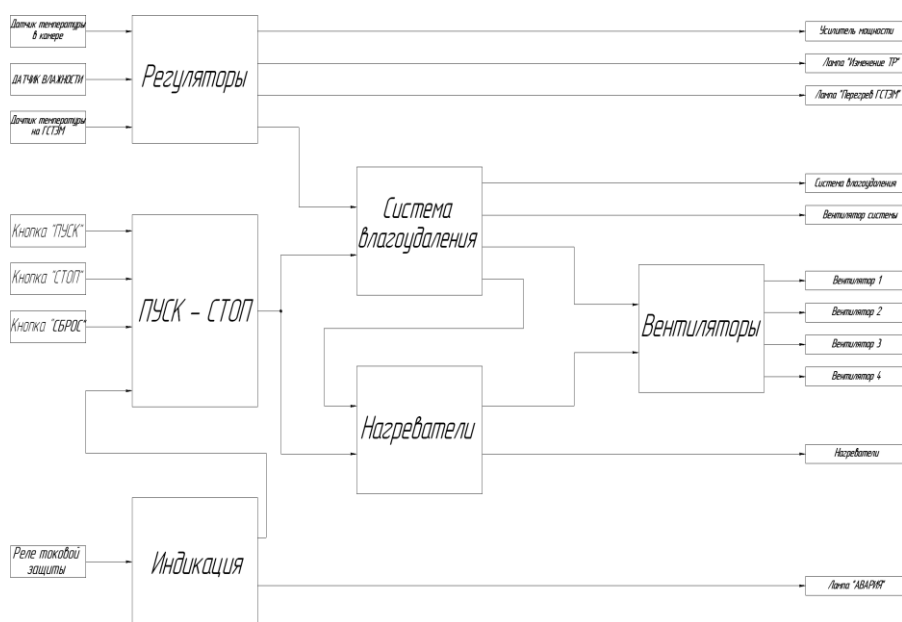
1. Цишевский, В.П. Механизмы и приводы электрических печей / В.П. Цишевский. М.: МЭИ, 1973.
2. Meritt, H.E. Hydraulic Control Systems / H.E. Meritt. New York, London, Sydney. John Wiley & Sons Inc., 1991.
3. Сапко, А.И. Исполнительные механизмы регуляторов мощности дуговых электропечей / А.И. Сапко. М.: Энергия, 1980.
4. Лапшин, И.В. Автоматизация дуговых печей / И.В. Лапшин. М., 2004.
5. Рубцов, В.П. Моделирование в технике / В.П. Рубцов, М.Я. Погребиский. М.: МЭИ, 2008.
6. Елизаров, К.А. Экспериментальное исследование электрогидравлического механизма перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи / К.А. Елизаров // Вестник МЭИ. 2009. № 3. С. 47-53.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ДЛЯ КОНДЕНСАЦИОННОЙ СУШКИ СЕМЯН РАСТЕНИЙ И ЛЕКАРСТВЕННЫХ ТРАВ

Автоматизация технологического процесса является одной из наиболее важных задач, решение которой не всегда приводит к качественному управлению процессом. В установке для конденсационной сушки семян и лекарственных трав используют в качестве теплового агента циркулирующий нагретый до температуры 18–50°C воздух. Удаление влаги из влажного воздуха происходит в системе влагоудаления, в основе которой лежит конструкция, разработанная с использованием термоэлектрических модулей, работающих на основе эффекта Пельтье.

Разработанная система управления построена на использовании микроконтроллера МС8 (рисунок). Выполняя разработанный функциональный алгоритм, микроконтроллер управляет основными узлами установки и осуществляет контроль параметров сушки, а именно: температуры процесса, относительной влажности воздуха и температуры горячих сторон термоэлектрических модулей, входящих в систему влагоудаления.

Система управления позволяет поддерживать температуру процесса на заданном уровне, используя ПИД – регулятор, который управляет тиристорным усилителем мощности, а также исключает возможность появления нестандартных ситуаций, которые могут негативно повлиять на качество технологического процесса.



Функциональная схема алгоритма микроконтроллера МС8:

ГСТЭМ – горячая сторона термоэлектрического модуля; ТР – температурный режим

Разработанная система управления обладает следующими преимуществами: во-первых, отсутствует релейно-контактный механизм управления, в котором происходят потери электрической энергии; во-вторых, система управления установкой является универсальной в силу возможности перепрограммирования микроконтроллера в случае конструктивного изменения установки или изменения параметров сушки; в-третьих, возможность подключения микроконтроллеров к персональному компьютеру или сети Internet делает установку дистанционной с точки зрения управления и контроля параметров сушки.

Соколов А.Ю.

Тверской государственный технический университет

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Электрическая дуга в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) является основной частью, определяющей работу печи и все ее основные параметры. Практически все тепло выделяется в дуговом разряде.

ДСП относятся к дуговым электропечам прямого действия. В таких печах дуги горят между электродами и расплавляемым металлом, непосредственно нагревая последний. Ток проходит между электродами по металлу. Дуга открытая, так как она ничем не ограничена в пространстве, кроме самих электродов. Циркуляция газов в околодуговом пространстве не затруднена, тепло свободно излучается.

Теплоотдача дуг в общем случае осуществляется тремя способами: излучением, теплопроводностью и конвекцией. Преобладание того или иного способа определяется условиями горения дуг. У длинных дуг, свободно горящих в воздухе между графитовыми электродами, теплоотдача осуществляется в основном конвекцией и в небольшой части – излучением. В дугах ДСП отдача тепла осуществляется преимущественно излучением, на долю излучения здесь приходится 90–98 % суммарного теплообмена [1].

Интенсивное излучение дуг в ДСП обусловлено рядом причин: высокие плотности тока при силе тока в дугах в десятки килоампер; горение дуг в парах металлов; электродинамическое сжатие столба дуги за счет собственного магнитного поля. Теплопередачу излучением в дугах

увеличивают искусственно путем добавления к материалу угольных электродов солей металлов (железа, кальция и др.).

При рассмотрении теплообмена излучением в ДСП допустимо считать, что излучение осуществляется поверхностным слоем столба дуги [1]. Такое допущение основано на том, что столб дуги, горящей в парах металла, является практически непрозрачным.

Окороков Н.В. и Пашкис В. в своих расчетах принимают, что 90% электрической мощности дуги выделяются в столбе дуги и излучаются по всем направлениям. Остальные 10% мощности дуги выделяются в приэлектродных областях, около графитового электрода и металла. Причем торец графитового электрода излучает на металл.

Окороков Н.В. при рассмотрении теплообмена в ДСП принимает, что излучение печной дуги близко к излучению абсолютно черного тела [2], с этим допущением согласен Сисоян Г.А. [3].

Электрическая дуга как газовый проводник, механически непрочный и обладающий малой массой, весьма чувствительна к действию магнитных полей, как собственного, так и внешнего.

Ток дуги создает собственное магнитное поле, поэтому в соответствии с законом Ампера на столб дуги действует электромагнитная сила взаимодействия между током дуги и собственным магнитным полем, т.е. столб дуги испытывает давление, направленное радиально от внешней поверхности столба радиусом к его оси (сжимающий эффект).

Столб дуги в механическом отношении малоустойчив, поэтому сжимающий эффект может вызвать значительные деформации поперечного сечения газового столба и при определенных условиях создать высокие плотности газа вдоль оси столба.

В жидких проводниках давление, обусловленное сжимающим эффектом, аналогично гидростатическому. Так как в любой точке давление одинаково передается по всем направлениям, то можно, подсчитав величину давления, его направление выбрать произвольно. Столб дуги по своей структуре неоднороден, поэтому аналогия между сжимающим эффектом в дуге и гидростатическим давлением меньше. Однако с некоторой неточностью и тут можно использовать эту аналогию. При таком допущении очевидно, что сила сжимающего эффекта будет действовать не только радиально, но и аксиально, создавая силу, действующую на электродные пятна дуги на электроде и на зеркале жидкометаллической ванны. Величина осевой силы определяется по формуле [4]

$$F_1 = \mu_0 \frac{I_A^2}{8\pi} = 5 \cdot 10^{-8} I_A^2. \quad (1)$$

Эта сила действует вдоль оси дуги на торец электрода и на жидкий расплав. Для торца электрода эта сила, конечно, не имеет значения, но ее действие на расплав весьма значительно. Например, в ДСП-100 при силе

тока дуги $I_d \approx 50$ кА осевая сила согласно (1) составляет 125 Н, а максимальное давление вблизи оси столба дуги при радиусе катодного пятна 0,0565 м (при плотности тока 5 МА/м²) равно 25 кПа, что соответствует гидростатическому давлению столба жидкой стали высотой примерно 0,3 м. Следовательно, в мощных ДСП осевое усилие плазмы дуги может деформировать зеркало ванны жидкого металла. При этом шлак и металл отбрасываются в сторону, образуя углубление в жидком расплаве, имеющее форму вогнутого мениска (рисунок).

Из формулы (1) видно, что осевая сила пропорциональна квадрату тока дуги, поэтому сильноточные дуги высокомо мощных ДСП создают в расплаве значительные углубления. При этом излучение заглубленной дуги на футеровку стен и свода снижается, так как дуга экранируется от последних металлом высотой h_m и шлаком высотой $h_{ш}$, а передача тепла жидкометаллической ванне увеличивается.

На практике оценить форму лунки, образуемой под воздействием электромагнитной силы F_1 , визуальн о или с помощью фотосъемки не представляется возможным. Наиболее вероятная форма лунки в месте соприкосновения дуги с ванной – шаровой сегмент. Дуга погружается на такую глубину, на которой осевая сила уравнивается гидростатическим давлением расплава. В мощных ДСП переменного тока при определенных электрических параметрах электродинамическое давление дуги на жидкометаллическую ванну может быть столь значительным, что высота образуемого в металле шарового сегмента превышает длину дуги, то есть нижний торец электрода находится ниже уровня поверхности ванны, а дуга полностью заглублена в металл. Электромагнитная сила F_1 , а также вырывающиеся из-под электрода раскаленные массы газов не позволяют соприкаться боковой поверхности электрода с расплавом, выровняться поверхности лунки с поверхностью металла.

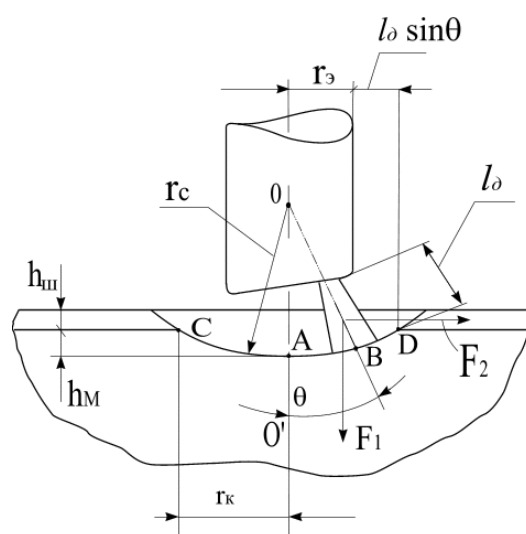


Рис. 1. Электрическая дуга в ДСП переменного тока

На площади данного круга выделяется значительная часть мощности дуги. Температура поверхности металла в этих зонах под электродами значительно выше температуры остальной поверхности ванны, поэтому их называют горячими зонами ванны металла.

Под электродинамическим воздействием шлак отбрасывается из-под электрода, толщина шлака не влияет на заглубление дуги в металл, поэтому отсчет заглубления производится не от уровня шлака, а от уровня металла. В результате исследования заглубления дуг в 100- и 200-тонных печах получены экспериментальные данные, показывающие, что величина заглубления дуги для этих печей составляет 3 мм/кА.

На столб дуги оказывает электродинамическое воздействие также магнитное поле токов, протекающих между электродами через жидкий металл перпендикулярно току дуги. Усиление магнитного поля во внутреннем углу перпендикулярных токов и ослабление поля снаружи угла создают электромагнитную силу F_2 , действующую на столб дуги и направленную в сторону футеровки по линии, где электрод и стенка печи находятся на минимальном расстоянии. Такая отклоняющая сила «выдувает» дугу из-под электрода в сторону футеровки, вызывая резкое повышение тепловой нагрузки стен против электродов (так называемые «горячие» зоны). Вследствие выдувания столб дуги занимает наклонное положение по отношению к зеркалу ванны (в среднем 45°).

Отклоняющая сила F_2 , действующая на дугу, приближенно может быть определена по формуле [4]:

$$F_2 = \mu I_d^2 \frac{l_d}{4\pi h}, \quad (2)$$

где μ – магнитная проницаемость плазмы дуги; h – расстояние до электрической оси токопроводящего слоя ванны жидкого металла от зеркала ванны, равное для условий ДСП 3,2–3,6 см.

Из выражения (2) видно, что отклоняющая сила F_2 пропорциональна квадрату тока и длине дуги. Практика показывает, что в коротких дугах восстановительного периода плавки отклоняющая сила F_2 может быть уравновешена осевой силой F_1 , поэтому дуга горит соосно с электродом. В период окончания расплавления длина дуги максимальна, наибольшего значения достигает и отклоняющая сила F_2 , которая больше осевой силы F_1 .

Столб дуги испытывает также электродинамическое воздействие магнитных полей параллельных токов, протекающих в соответствии с чередованием фаз трехфазной системы токов по соседним электродам. Но возникающая при этом электромагнитная сила отталкивания составляет всего 2–5% от F_2 , снижаясь с уменьшением длины дуги [4].

Библиографический список

1. Макаров, А.Н. Теплообмен в дуговых сталеплавильных печах / А.Н. Макаров. Тверь: ТГТУ, 1998. 184 с.
2. Огороков, Н.В. Дуговые сталеплавильные печи / Н.В. Огороков. М.: Металлургия, 1971. 344 с.
3. Сисоян, Г.А. Электрическая дуга в электрической печи / Г.А. Сисоян. М.: Металлургия, 1971. 304 с.
4. Егоров, А.В. Электроплавильные печи черной металлургии / А.В. Егоров. М.: Металлургия, 1985. 280 с.

Енин А.С., Лобзина М.А., Апиyo Вини Адхиамбо

Тверской государственный технический университет

УМЕНЬШЕНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ЦЕХОВЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Практика энергетических аудитов, выполненных Учебно-научно-производственным центром «Энергоэффективность» ТГТУ, указывает на то, что потери мощности и энергии в системах электроснабжения составляют заметную долю в электроэнергетическом балансе обследованных объектов. Данные по одному из предприятий [1] приведены на рис. 1. Очевидно, что уменьшение потерь мощности и энергии в системах электроснабжения является эффективным энергосберегающим мероприятием.

Значительная часть потерь электроэнергии, как показали обследования, приходится на долю цеховых силовых трансформаторов. При этом возможно проведение работ по уменьшению этих потерь [2].

В настоящее время до 70% цеховых трансформаторов 10(6)/0,4 кВ крупных промышленных предприятий города Твери эксплуатируются 30 и более лет. Это приводит к увеличению потерь холостого хода, которые растут примерно на 10% каждые 10 лет из-за структурных изменений металла магнитопровода, а также из-за механических воздействий (вибрация, электродинамические усилия и т.д.) на пластины магнитопровода [3].

Кроме того, в современных силовых трансформаторах применяются новейшие электротехнические материалы и конструкторские разработки, что снижает потери холостого хода на 30–45% относительно потерь в аналогичных трансформаторах, выпущенных 40 лет назад.

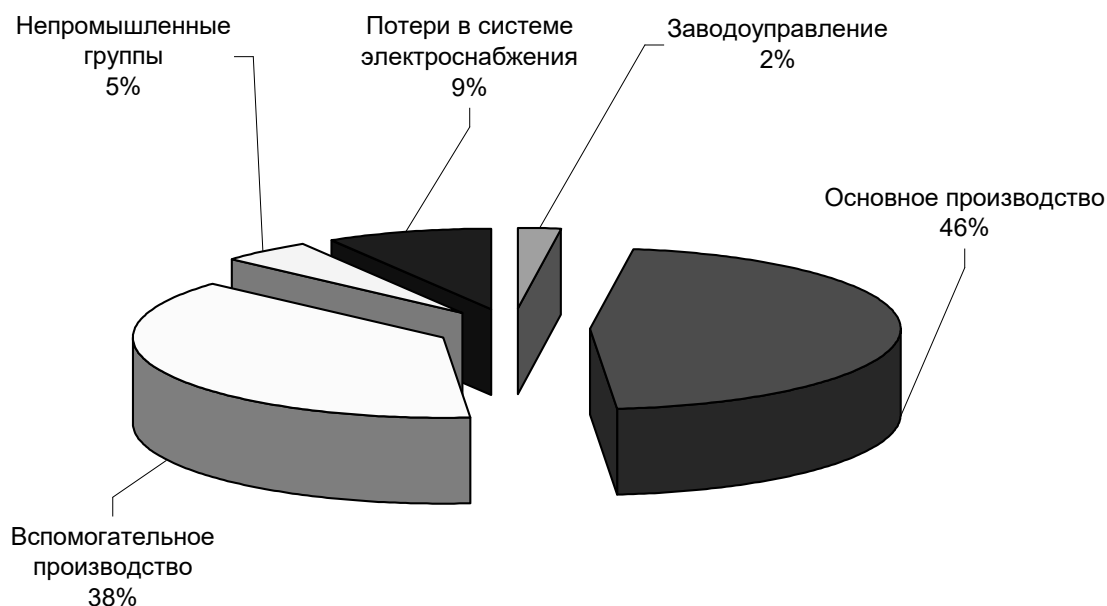


Рис. 1. Баланс мощности промышленного предприятия

Для уменьшения потерь целесообразно в течение 10–15 лет осуществлять поэтапную замену трансформаторов, отработавших 30 лет и более, имеющих низкую энергетическую эффективность.

При этом на двухтрансформаторных подстанциях, не снижая уровня надёжности электроснабжения, можно отключать один из систематически недогруженных (до 20%) трансформаторов, поскольку при малой нагрузке трансформаторов относительная величина потерь мощности и энергии в них заметно возрастает. Целесообразно проводить это мероприятие и в отношении трансформаторов, недогруженных в определённое время суток, например, в ночные часы (рис. 2).

На подстанциях с двумя трансформаторами вывод одного из них в резерв это становится целесообразным при

$$K_z^2 < 2 \cdot \Delta P_{xx} / \Delta P_{kz},$$

где K_z – коэффициент загрузки трансформатора; ΔP_{xx} – потери холостого хода; ΔP_{kz} – потери короткого замыкания.

Экономический эффект от замены трансформаторов, отработавших 30 и более лет, проиллюстрирован на примере, приведённом в таблице, где показаны ориентировочные затраты на реализацию мероприятия, энергосберегающий и экономический эффект при произвольно экстраполированной динамике роста тарифов. Срок окупаемости мероприятия составит менее пяти лет.

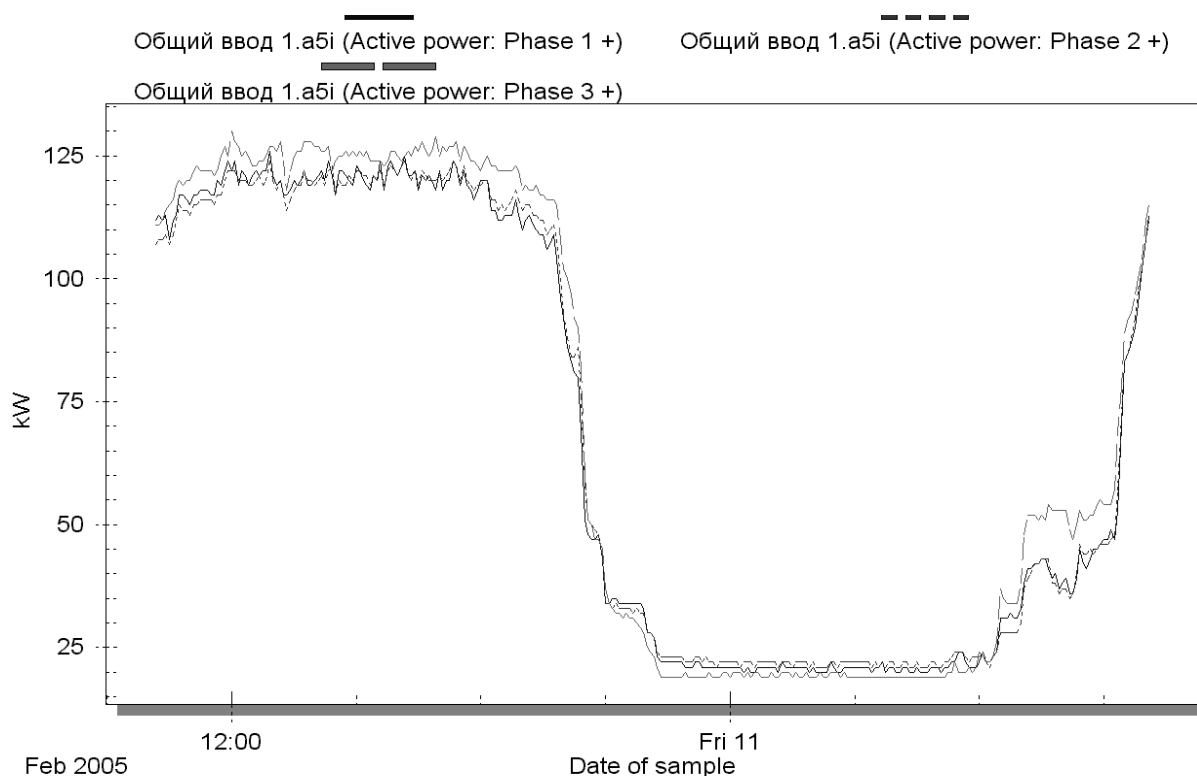


Рис. 2. Суточный график загрузки цехового трансформатора
(по результатам энергоаудита)

Возможная динамика затрат и эффективности при замене
трансформаторов, отработавших 30 и более лет

Годы	Нт, шт.	Ст, кВА St	З, млн. руб.	ΔW , тыс. кВт·ч	А, руб./кВт·ч	ΔZ , млн. руб.
2010	9	7 890	4,73		3,32	—
2011	9	6 760	4,06	152,2	3,69	0,56
2012	9	6410	3,85	259,7	4,06	1,05
2013	9	6410	3,85	342,1	4,26	1,46
2014	7	5 150	3,09	449,9	4,47	2,01
Последующие годы				538,5	4,69	2,53
Всего:	43	32 620	19,57			7,61

Примечание. Нт – количество заменяемых трансформаторов; Ст – суммарная мощность заменяемых трансформаторов; З – затраты на замену трансформаторов; ΔW – экономия электроэнергии; А – прогнозируемая стоимость потерь электроэнергии; ΔZ – экономия денежных средств.

Библиографический список

1. Узикова, Т.И. Энергетическое обследование ОАО «Центросвар» с целью составления энергетического паспорта: отчёт НИР, рег. №11-05 / Т.И. Узикова [и др.]. Тверь: УНПЦЭ ТГТУ, 2005.
2. Енин, А.С. К расчёту потерь мощности в силовых трансформаторах / А.С. Енин, К.Б. Корнеев, Т.И. Узикова // Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Тверь: ТГТУ, 2005 . Вып. 6. С. 75-79.
3. Заугольников, В.Ф. Некоторые аспекты экономичной работы силовых трансформаторов / В.Ф. Заугольников, А.А. Балабин, А.А. Савинков // «Промышленная энергетика». 2006. № 4. С 5.

Устьянов С.С.

Тверской государственный технический университет

БОРЬБА С ХИЩЕНИЯМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И НЕПЛАТЕЖАМИ

Одним из ключевых слов в деле развития энергетической отрасли является понятие «рентабельность». Рентабельность подразумевает максимальное увеличение доходов при минимизации расходов. Доходы – это, прежде всего, материальные средства, которые собираются с потребителей за полученный ими товар – электроэнергию. В условиях рыночной экономики именно получение денег является приоритетной задачей. Конечно снижение потерь в электросетях, повышение КПД генерации электроэнергии тоже важны, но это всего лишь позволяет сберечь товар, который еще предстоит продать. А вот борьба с хищениями – это получение живых денег. При этом следует помнить о том, что энергетики борются с неплательщиками не с целью личного обогащения, а с целью получения средств на развитие отрасли, улучшения качества и надежности электроснабжения, снижения стоимости, укрепления энергобезопасности и в целом развития нашего государства. Именно эту мысль следует донести до потребителей, что будет эффективнее всех других средств борьбы с неплатежами, вместе взятыми, но пока нам это сделать не удалось, будем пользоваться другими методами, речь о которых пойдет ниже.

По оценкам независимых экспертов (по данным журнала «Энергетик»), только в 2006 году потери составили около 130 млрд кВт/ч. Для сравнения: примерно столько же электроэнергии вырабатывают все атомные электростанции страны.

Большинство потерь является прямым следствием недоучета и хищений электроэнергии, захлестнувших в последние годы предприятия электросети. Причем потери электроэнергии характерны для электрических сетей всех уровней напряжения, любой формы собственности и принадлежности – от сетей промышленных предприятий 0,4–10 кВ до магистральных электрических сетей 220–750 кВ.

Все способы хищения электроэнергии можно разделить на расчетные и технологические. К расчетным методам относятся: занижение фактического потребления электроэнергии, занижение расчетных активных потерь в абонентских трансформаторах, недобросовестный подсчет при использовании ступенчатых тарифов, использование ограничений счетного механизма счетчиков; к технологическим – подключение нагрузки к безучетным питающим сетям, изменение схем коммутации приборов учета, внешнее воздействие на счетный механизм счетчика.

Существующая организация системы сбыта находится в неудовлетворительном состоянии, и системы учета электроэнергии технически несовершенны, можно выделить присущие им недостатки.

Большие нарекания вызывают существующие приборы учета. Применяемые в большинстве случаев счетчики индукционной схемы обладают такими существенными недостатками, как значительная погрешность, потеря нормируемой точности, конструктивное несовершенство, низкое качество изготовления и т.д. И хотя эти приборы уже практически не устанавливаются, парк их останется значительным еще долгие годы.

Применяемые измерительные трансформаторы тока и напряжения обладают значительной погрешностью, особенно при малых нагрузках. В настоящее время это имеет большое значение, так как многие промышленные предприятия в условиях кризиса значительно снизили объемы производства, и трансформаторы тока и напряжения постоянно работают в режимах с пониженной нагрузкой.

Свою роль играет и сложившееся ранее отношение к учету электроэнергии как к второстепенному и малозначащему фактору в работе энергообъектов. Это обстоятельство приводит к нерациональному выбору средств измерения, применению устаревших технических средств измерения и контроля. Сложившаяся на энергообъектах практика подключения к измерительным трансформаторам устройств службы релейной защиты, электроавтоматики и электроизмерений нарушает нормированные электрические режимы работы и приводит к выходу трансформаторов за допускаемые классом точности пределы.

Отдельно следует упомянуть систему расчетов с бытовыми потребителями. Применяемая в настоящее время система самообслу-

живания далеко не идеальна и в определенном смысле построена на доверии.

Разновременность снятия показаний счетчиков, произвольные округления показаний, несвоевременная оплата потребленной энергии значительно искажают показатели потерь отпуска и потерь электроэнергии.

Ни одно отдельно взятое мероприятие по обнаружению, предотвращению и устранению случаев хищения электроэнергии не может дать какого-либо ощутимого эффекта. Их применение должно быть комплексным: одно мероприятие должно дополнять другое.

Начинать работу следует с совершенствования организационных мероприятий. В УК РФ и КоАП РФ приведено достаточное количество статей, по которым можно привлекать неплательщиков. К сожалению, в правовой сфере энергоснабжающими организациями активной работы практически не ведется. Причин тому несколько: это и низкий профессионализм сотрудников; можно предположить также, что дело здесь и в нарушениях правовых актов самих энергоснабжающих организаций, например, при заключениях договоров, при применении незаконных санкций против неплательщиков. К организационным можно отнести также такие методы, как организация рейдов с привлечением правоохранительных структур, создание телефонов доверия, систем поощрения контролеров, применение АСКУЭ, применение систем дистанционного контроля.

Технические мероприятия. Конечно, совершенствовать конструкцию индукционных счетчиков на сегодняшний момент нет никакого смысла. Но вот улучшить систему их пломбирования и подключения было бы разумно. Применение электронных счетчиков может не только помочь в борьбе с хищениями, но и существенно снизить погрешность измерений. Применение защитных экранов на тех моделях счетчиков, где такая защита не предусмотрена, позволяет бороться с более квалифицированными нарушителями. Наиболее перспективным направлением борьбы с хищениями является совершенствование приборов-индикаторов для обнаружения скрытых способов хищения электроэнергии. Эти приборы чрезвычайно разнообразны по принципу действия и по функциям.

Иногда решение бывает не совсем тривиальным. Техническое нововведение, казалось бы, не имеющее никакого отношения к борьбе с хищениями, может показать необычайно высокие результаты. Например, применение СИПа в Саратовской области позволило снизить так называемые коммерческие потери почти на 25%. Цифра достаточно большая, в других регионах эта мера может и не дать подобного эффекта, но случай этот показателен. Все это говорит о том, что проблема решается и ситуацию с хищениями и неплатежами можно переломить.

В совершенствовании нуждается вся система борьбы с хищениями и неплатежами, но малоизученной и обделенной вниманием является область обнаружения хищений, в частности инструментального обнаружения скрытых способов хищения.

Узикова Т.И., Корнеев К.Б., Коробёнков П.

Тверской государственный технический университет

ТЕПЛОВИЗИОННАЯ ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Одной из наиболее распространённых причин выхода из строя электрооборудования является старение (износ) материалов – от 10 до 25% в зависимости от рабочего напряжения; это единственная причина, поддающаяся прогнозу и профилактическим работам по снижению вероятности отказов. Так как на настоящий момент прогнозирование выхода из строя каждого электроконтактного соединения является сложной математической задачей, требующей больших вычислительных мощностей, то особое внимание должно быть уделено мониторингу их состояния. Критериями нормальной работы электроконтактного соединения являются сопротивление и температура перегрева. Для определения сопротивления (особенно на напряжениях более 6 кВ) необходимы вывод контактного соединения из эксплуатации, проведение замеров сопротивления при испытательных токах и напряжениях (по ГОСТ 24606.3-82), а потом ввод соединения обратно в эксплуатацию. Такой метод является крайне неэффективным с технической и экономической точек зрения и не обеспечивает должной надежности. Более предпочтительным является мониторинг температуры перегрева контактного соединения, который ещё на ранних этапах по неравномерности картины температурного поля позволяет установить предпосылки к выходу контактного соединения из строя.

Одним из наиболее совершенных с технической точки зрения способов диагностики перегрева является использование бесконтактных измерителей температуры и тепловизионной техники. Это позволяет производить практически одновременные замеры температуры с достаточно высокой точностью и низкой латентностью. При использовании инфракрасного сенсора в виде тепловизора возможно осуществление записи процесса изменения температуры во времени. Минусом данного метода является возможность фиксации температуры лишь на поверхности объекта, а также узкая избирательность, то есть

невозможность фиксации двух точек с большим перепадом температур, расположенных в непосредственной близости.

Тепловизионная диагностика высоковольтного электрооборудования с помощью систем типа Termovision-487 и NEC 5104 позволяет выявлять аномальные температурные состояния на энергообъектах при различных нагрузках электрических линий. Чувствительность тепловизоров и качество термограмм позволяют локализовать перегрев до $0,1^{\circ}\text{C}$, осуществлять тепловизионные замеры при различных величинах протекающих токов.

Для экспертной оценки, статистического анализа данных тепловизионного контроля, прогнозирования срока службы оборудования с помощью тепловизионного контроля операторам необходимо производить пересчет данных тепловизионного контроля, полученных при конкретных условиях испытаний на повышенную нагрузку, например, 50 или 100% по току.

Опыт эксплуатации тепловизионной техники при низких нагрузках (2–10% по току) и прогнозирования работы оборудования, а также специально проведенные Учебно-научно-производственным центром «Энергоэффективность» ТГТУ эксперименты, показывают, что даже такие значения нагрузок позволяют диагностировать нарушение эксплуатационных характеристик электроконтактных соединений и рекомендовать меры по предотвращению развития процесса и перехода его в аварийный режим.

Визуальное представление термограмм вместе с одновременной фиксацией фотоизображения объекта является хорошим наглядным способом мониторинга состояния объектов энергосистем, что для энергослужб предприятий служит хорошим подспорьем при разработке графиков планово-предупредительных ремонтов электрооборудования, а также мероприятий по текущему обслуживанию.

В рамках энергетических аудитов учреждений высшего образования, выполненных УНПЦ «Энергоэффективность» в 2009 году, проводились тепловизионные исследования состояния электроконтактных соединений. Результаты показали значительные превышения температуры на ряде объектов, что свидетельствует о значительных отклонениях эксплуатационных характеристик контактных соединений от номинальных. Фотографии диагностируемых элементов и соответствующие им термограммы представлены на рис. 1 – 12.

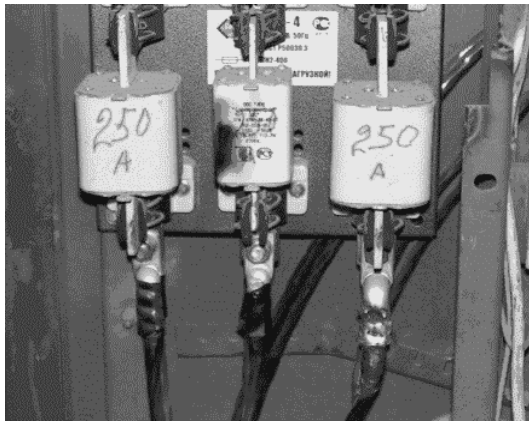


Рис. 1. Вводной электрощит объекта №1

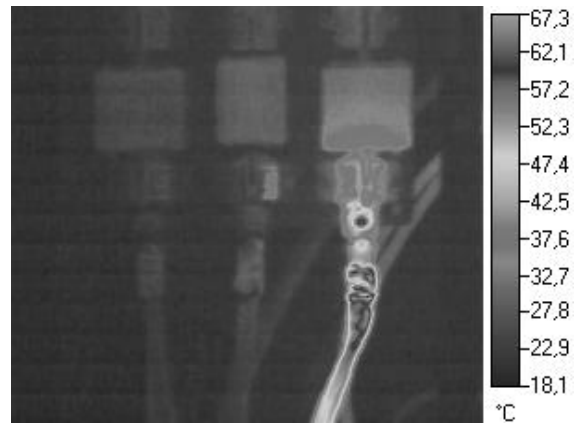


Рис. 2. Тепловизионная съемка

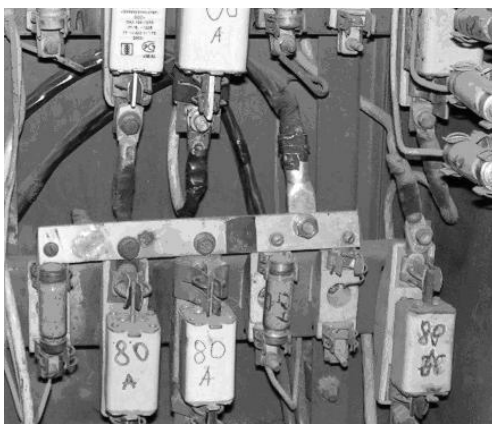


Рис. 3. Распределительный электрощит объекта №1

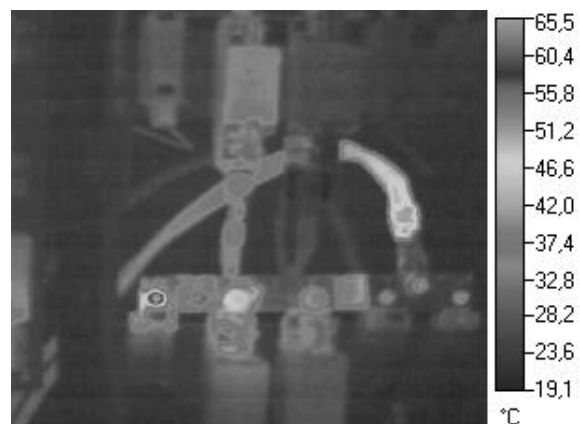


Рис. 4. Тепловизионная съемка



Рис. 5. Вводной электрощит объекта №2

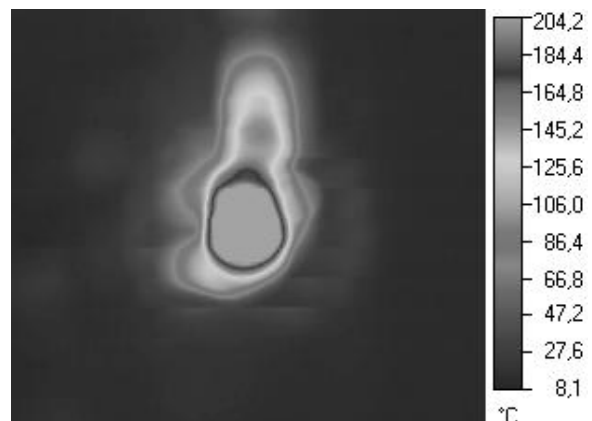


Рис. 6. Тепловизионная съемка

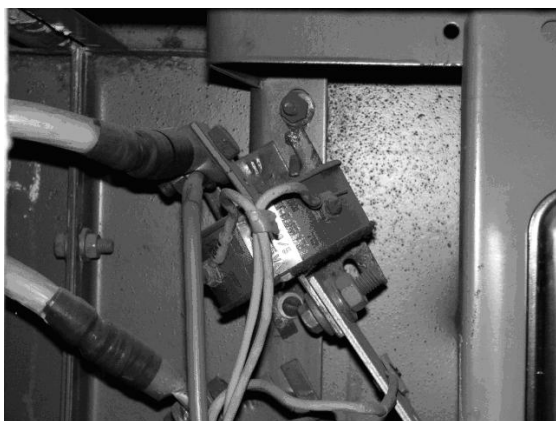


Рис. 7. Трансформатор тока на вводе объекта №3

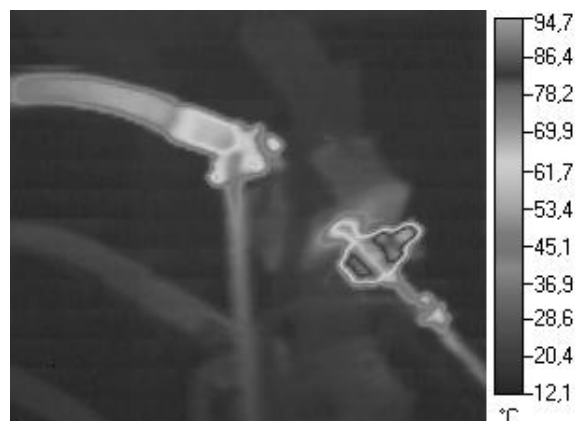


Рис. 8. Тепловизионная съемка

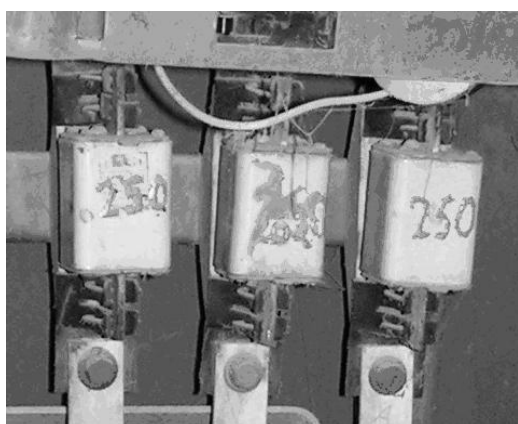


Рис. 9. Распределительный электрощит объекта №4

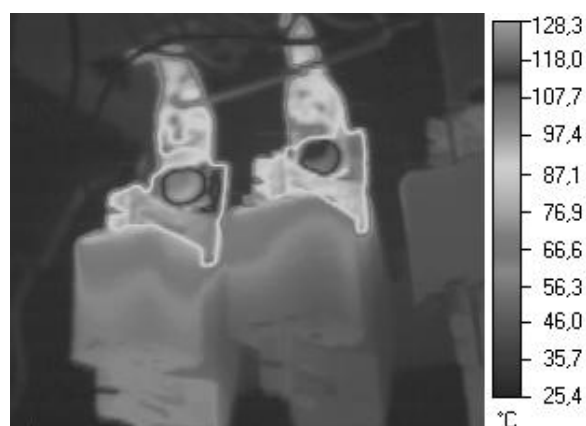


Рис. 10. Тепловизионная съемка

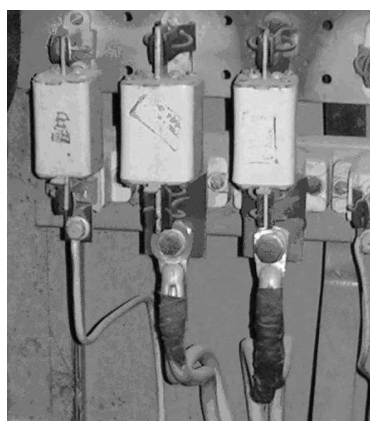


Рис. 11. Распределительный электрощит объекта №5

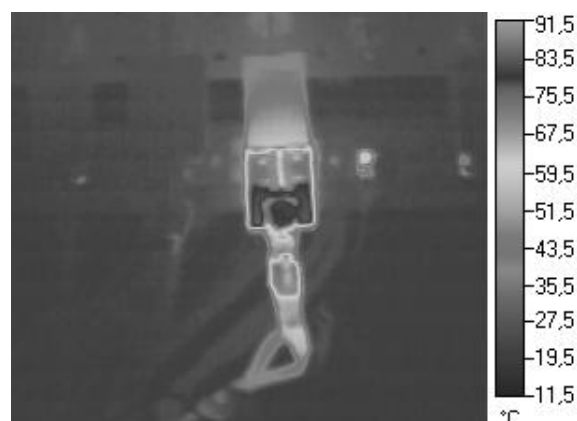


Рис. 12. Тепловизионная съемка

Анализ тепловизионных картин, а также условий эксплуатации (величины токов и напряжений) позволил выявить причины такого значительного разогрева и устранить их. Последующий мониторинг показал, что перегрев после принятия необходимых мер был устранён.

АНАЛИЗ ПОТЕРЬ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА ПОСЛЕ ПЕРЕСТРОЙКИ

Суммарные потери электроэнергии в энергосистеме (электросети, по фидеру) определяются как разность между количеством электроэнергии, поступившей в энергосистему (электросеть, по фидеру) и количеством электроэнергии, учтённой в качестве потреблённой абонентами. Часть потерь составляют технические – потери электроэнергии в процессе её преобразования, распределения и передачи по проводам и кабелям. Разность между фактическими и техническими потерями обычно определяют как коммерческие потери. Коммерческие потери состоят из нескольких частей. Одна из них связана с искажением величин расходов электроэнергии, которая частично может потом попасть в продажу, но прежде заметно искажает баланс[1].

Известно, источниками потерь электрической энергии в системах электроснабжения, применительно к МУП «Тверьгорэлектро», являются электрические сети высокого напряжения, понижающие трансформаторы и электроприёмники. Суточные потери в электрических сетях трёхфазного тока определяются выражением

$$\Delta W_{\text{л}} = 0,003 \cdot I_{\text{ср}}^2 \cdot R_{\text{уд}} \cdot L_{\text{ср}} \cdot T_{\text{сут}},$$

где $\Delta W_{\text{л}}$ – потери электроэнергии в линии фидера за сутки, кВт·ч; $I_{\text{ср}}$ – среднее значение тока, протекающего по данной линии, А; $R_{\text{уд}}$ – активное удельное сопротивление фазы линии, Ом/км; $L_{\text{ср}}$ – средняя длина линии группы потребителей по кабельному журналу «Тверьгорэлектро», км; $T_{\text{сут}}$ – время работы линии и электроанализатора, 24 ч.

Среднее значение тока линии определяется по показаниям счетчиков активной и реактивной энергии за время суток и вычисляется по формуле

$$I_{\text{ср}} = \frac{\sqrt{W_{\text{а}} + W_{\text{р}}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot T_{\text{сут}}},$$

где $W_{\text{а}}$ – активная энергия за сутки, кВт·ч; $W_{\text{р}}$ – реактивная энергия за сутки, кВАр·ч; $U_{\text{л}}$ – линейное напряжение фидера, кВ.

Трансформаторы, применяемые на подстанциях ОАО «Тверьгорэлектро» – двухобмоточные, трёхфазные, масляные. Для двухобмоточных трансформаторов суточные потери активной энергии определяются по выражению

$$\Delta W_{\text{тр}} = \Delta P_{\text{хх}} \cdot T_{\text{сут}} + K^2_{\text{з.тр}} \cdot \Delta P_{\text{кз}} \cdot T_{\text{сут}},$$

где $\Delta W_{\text{тр}}$ – потери электроэнергии в трансформаторе за сутки, кВт·ч; $\Delta P_{\text{хх}}$ и $\Delta P_{\text{кз}}$ – потери холостого хода и короткого замыкания по справочнику, кВт; $K_{\text{з.тр}}$ – коэффициент загрузки трансформатора; $T_{\text{сут}}$ – время работы трансформатора и электроанализатора, 24 ч.

Коэффициент загрузки трансформаторов определяется, исходя из условий, что фактическая мощность фидера складывается из равномерно распределённой нагрузки всех трансформаторных подстанций присоединения в зависимости от их установленной мощности. Коэффициент загрузки трансформаторов определяется отношением:

$$K_{\text{з.тр}} = I_{\text{ср}}/I_{\text{н}},$$

где $I_{\text{н}}$ – суммарный номинальный ток ТП фидера, А.

Определение потерь в кабельных линиях потребителей низкого напряжения производится по тем же формулам, что и для линий высокого напряжения. Но вместо $I_{\text{ср}}$ используется ток I_2 , зависящий от мощности трансформатора и нагрузки. Как видно из вышеприведенных выражений, технические потери, в основном, зависят от тока в квадрате.

Однако спад производства последних лет привёл к уменьшению нагрузок в ряде фидеров на подстанциях электрических сетей из-за снижения потребления электроэнергии промышленностью, что вызвало возникновение отрицательной погрешности в системах контроля и учёта электроэнергии. Причиной тому стало возникновение отрицательной погрешности у первичных датчиков – трансформаторов тока. Погрешности измерительных трансформаторов тока, токовая и угловая, обусловлены наличием первичного тока намагничивания и зависят от коэффициента загрузки трансформаторов тока. Так, например, для трансформатора тока типа ТПОЛ – 600/5, класса точности 0,5 при загрузке в 10% токовая погрешность составляет $\pm 1\%$, а угловая погрешность ± 60 мин. При загрузке в 100% – токовая $\pm 0,5\%$, а угловая ± 30 мин [2]. Рекомендуемый диапазон коэффициента загрузки трансформаторов тока составляет от 50 до 100%. При такой загрузке погрешность будет минимальной.

Вторым источником погрешности измерения электроэнергии на высоком напряжении является трансформатор напряжения – TV. Известно, погрешность TV зависит от величины вторичной нагрузки. Большую часть нагрузки TV составляют измерительные приборы, в частности счётчики типа САЗУ-И670М, потребляемая мощность которых 4Вт. При этом погрешность TV составляет 1,15%. Снижение мощности в два раза, до 2 Вт, уменьшает погрешность до 0,5% [2].

По заданию МУП «Тверьгорэлектро» проведен анализ систем электроснабжения некоторых подстанций города. Среднестатистические данные по потерям, загрузке трансформаторов тока, отклонению напряжения и другие данные по фидерам, полученные в процессе преобразования и передачи электроэнергии в течение суток приведены в таблице.

Среднестатистические данные замеров на подстанциях

№ п/п	Наименование подстанции, фидера	Иср, А	$\Delta W_{л}$, кВт·ч	$\Delta W_{тр}$, кВт·ч	Нагрузка ТТ, %	ΔU , % max	ΔU , % min
1	Северная Т-1, ф.16	206	1385	847	13,7	+6,3	+3,5
2	Северная Т-2, ф.34	170	1849	703	11,3	+6,7	+3,9
3	З-д Штампов, ф.2	58	163	230	14,5	-8,8	-1,6
4	З-д Штампов, ф.4	27	28	126	6,7	-6,8	0
5	Ф.Вагжанова, ф.2	115	686	355	38,2	-2,8	+1,2
6	Ф.Вагжанова, ф.4	136	1075	326	68,0	+6,3	+0,3
7	Ф.Вагжанова, ф.20	155	783	515	38,7	-4,0	+2,3
8	Ф.Вагжанова, ф.9	104	377	291	26,1	-3,6	+0,3
9	Ф.Вагжанова, ф.8	80	420	--	--	-4,0	+ 0,3
10	Ф.Вагжанова, ф.14	109	474	308	27,1	-3,6	0
11	Ф.Вагжанова, ф.15	72	363	301	18,1	+0,7	0
12	Ф.Вагжанова, ф.18	56	260	234	18,7	+7,5	+0,3
13	Ф.Вагжанова, ф.16	61	108	--	20,3	+6,7	+1,2
14	Пролетарская, ф.28	60	97	324	10,5	+5,5	+3,1
15	Пролетарская, ф.20	40	43	218	10,0	+6,3	+2,3
16	Пролетарская, ф.6	19	кз-откл	15 т п	--	+5,5	+2,3
17	Пролетарская, ф.26	24	8,3	129	--	+4,3	+2,0
18	Пл.Капошвара, ф.14	36	26	208	11,8	+4,7	- 0,8
19	Пл.Капошвара, ф.15	41	248	309	13,6	+4,7	- 0,8
20	Пл.Капошвара, ф.21	57	282	335	18,8	- 2,4	+0,8
21	Пл.Капошвара, ф.24	55	164	365	27,5	- 2,8	+1,2
22	Заволжская, ф.3	111	138	428	36,9	+5,9	+1,9
23	Заволжская, ф.7	48	123	241	8,0	+5,5	+1,1
24	Заволжская, ф.9	158	347	303	нет сх.	+5,1	+0,3
25	Заволжская, ф.17	61	176	205	10,2	+5,9	+1,9
26	Заволжская, ф.18	31	32	53	5,1	+5,5	+1,9
27	Заволжская, ф.19	11	4,5	164	1,9	+4,7	+1,1
28	Заволжская, ф.20	31	50	108	10,4	+5,9	+1,6
29	Затверецкая, ф.2	88	403	265	14,6	+6,7	+1,9
30	Затверецкая, ф.30	94	370	197	15,6	-1,6	0
31	Глазково, ф.2	60	90	310	15,0	-1,2	- 0,8
32	Элеватор, ф.17	33	112	208	8,3	+5,1	+4,3
33	Подстанция №4, ф.3	52	260	301	13,0	+5,5	+5,4
34	Соминка, ф.29	71	368	256	18,0	+1,2	+0,8
35	Стекловолок., ф.9	74	327	238	12,3	+4,7	+3,9
36	Мехзавод, ф.38	116	438	304	19,3	+1,5	+0,7
37	Южная, ф.10	64	168	197	16,0	+3,9	+3,9
38	Экскават.з-д, ф.56	48	120	232	12,0	-1,2	0

Исследования полученных данных позволяют сделать следующие выводы:

1. У трансформаторов тока в диапазоне изменения нагрузки от 1 до 25% токовая погрешность имеет отрицательный знак, т.е. количество электроэнергии, отпускаемой потребителям, занижено по сравнению с

фактической величиной. Из 34 фидеров, различных подстанций города, на которых проведены замеры электрических параметров в 2002 году, 27 фидеров имеют трансформаторы тока, загрузка которых снизилась до уровня менее 25%, т.е. 80% фидеров работают в зоне самой большой погрешности для трансформаторов тока.

2. Учёт токовой погрешности трансформаторов тока позволит уменьшить величину небаланса по подстанциям, более точно оценивать величину отпускаемой электроэнергии и получить определённый экономический эффект.

3. Отказ от применения счётчиков активной энергии электромагнитного типа САЗУ-И670М и замена их на электронные, например, типа ПСЧ, мощность которых в два раза меньше, приведёт к повышению точности учёта, отпущенной потребителям электроэнергии.

4. Отклонения напряжения по фидерам находятся в пределах требований ГОСТа на качество электроэнергии. Однако отклонения напряжения в плюсовую сторону увеличивают коммерческие потери в местах, где не установлены приборы учёта (рекламные щиты, иллюминация и др.), так как потребители электрической энергии в этом случае оказываются под повышенным напряжением. При расчётах за электроэнергию учитывается номинальная мощность потребителей при номинальном напряжении. Таких фидеров, где отклонения напряжения имеют только плюсовые границы, в системе электроснабжения около 60%.

5. Экспериментальными исследованиями установлено, что после перестройки кабельные линии города напряжением 6 кВ загружены на 60%, линии 10 кВ всего на 35%, а среднестатистическая загрузка трансформаторов равна 46%.

6. В связи с принятием федеральной программы «Энергосбережение» и переходом на менее мощные источники света начиная с 2010 г. предполагается дальнейшее уменьшение токовой нагрузки. В этом случае на некоторых фидерах замена трансформаторов тока на другие становится рекомендуемым мероприятием.

Библиографический список

1. Мешман, Ю.Г. «О потерях электроэнергии в АО «Мосэнерго» / Ю.Г. Мешман // «Энергосбережение». №3. 2000.

2. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Бугров В.Г., Левыкин Д.А., Алисова О.А., Цыганов И.М.

Тверской государственный технический университет

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ РАЙОННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Системы электроснабжения отдельных районов (СЭР) объединяют электрические линии и подстанции, передающие электрическую энергию от районных трансформаторных подстанций (РТП) до потребителей района. СЭР может включать ВЛ 6 – 35 кВ ТП (трансформаторные подстанции) и отходящие от них ВЛ 0,4 кВ в границах района.

Надежность и бесперебойность работы силовых электротехнических комплексов и систем во многом определяются работой элементов, составляющих их: силовых трансформаторов, обеспечивающих преобразование ряда параметров электроэнергии в требуемые величины для дальнейшего ее использования. Одним из перспективных направлений повышения эффективности функционирования электротехнического оборудования является совершенствование системы технического обслуживания и ремонтов электрооборудования.

Ремонты электрооборудования планируют, исходя из межремонтных периодов, ремонтных циклов и их структуры. Основой для определения межремонтного периода и ремонтного цикла служит расчетное или действительное время, в течение которого электрооборудование способно работать в заданных режимах.

В настоящее время разработана концепция эксплуатации электротехнического оборудования по техническому состоянию путем более глубокого подхода к назначению периодичности и объемов технического обслуживания и ремонтов по результатам диагностических обследований и мониторинга электротехнического оборудования в целом и трансформаторного оборудования в частности как неотъемлемого элемента любой электротехнической системы.

Принятие решения по замене оборудования должно основываться на результатах постоянного контроля его технического состояния в эксплуатации и оценке его физического ресурса. Внедрение современных средств и методик контроля технического состояния позволяет принимать правильные решения о необходимости проведения ревизий и предупредительных ремонтов, а также решений о продолжении сроков эксплуатации оборудования с истекшим сроком службы на базе более точного определения остаточного физического ресурса.

Эффективная программа оценки состояния оборудования должна быть сфокусирована на факторах, которые реально влияют на «жизнь»

элементов электрооборудования. До настоящего времени отсутствуют надежные методы, позволяющие достоверно оценить степень износа и предсказать остаточный ресурс изоляции. Например, обычным результатом работы по диагностике состояния трансформатора является заключение о соответствии или несоответствии нормированных испытаний формально установленным критериям, которые слабо и косвенно связаны с функциональной работоспособностью трансформатора.

При переходе к системе ремонтов по техническому состоянию качественно изменяются требования к системе диагностирования электрооборудования, при которой главной задачей диагностирования становится прогноз технического состояния на относительно длительный период. Решение такой задачи не является тривиальным и возможно только при комплексном подходе к совершенствованию методов, средств, алгоритмов и организационно-технических форм диагностирования.

Основными задачами диагностического контроля являются предотвращение аварийного отказа оборудования, определение его состояния и прогнозирование остаточного ресурса как одного из главных показателей надежности.

Отказ элемента системы электроснабжения – следствие воздействия очень большого числа независимых случайных факторов, причем выделить какой-либо главный трудно, и до сих пор этого не было сделано. Следовательно, сила воздействия каждого отдельного фактора мала и не может превалировать среди остальных, характер воздействия – аддитивный.

Длительный опыт эксплуатации систем электроснабжения районов подтверждает, что с течением времени меняются их технико-экономические показатели. Причинами этих изменений является непрерывный рост электрических нагрузок потребителей, а также физический и моральный износ части сетевого оборудования. Причинами отказа могут являться и непредвиденные аварийные ситуации.

Сказанное позволяет предположить, что прогнозирование безаварийной работы оборудования может основываться на вероятностном подходе, то есть на результатах статистической обработки результатов предыдущей и текущей эксплуатации оборудования. Это позволит уточнить планирование времени межремонтных периодов и возможную длительность ремонтов.

Алгоритмическое и программное обеспечение прогнозирования эксплуатационной надёжности оборудования в рамках данной работы разбито на 3 части:

- 1) формирование массива данных об отказах электрооборудования;
- 2) проверка гипотез о соответствии статистики отказов

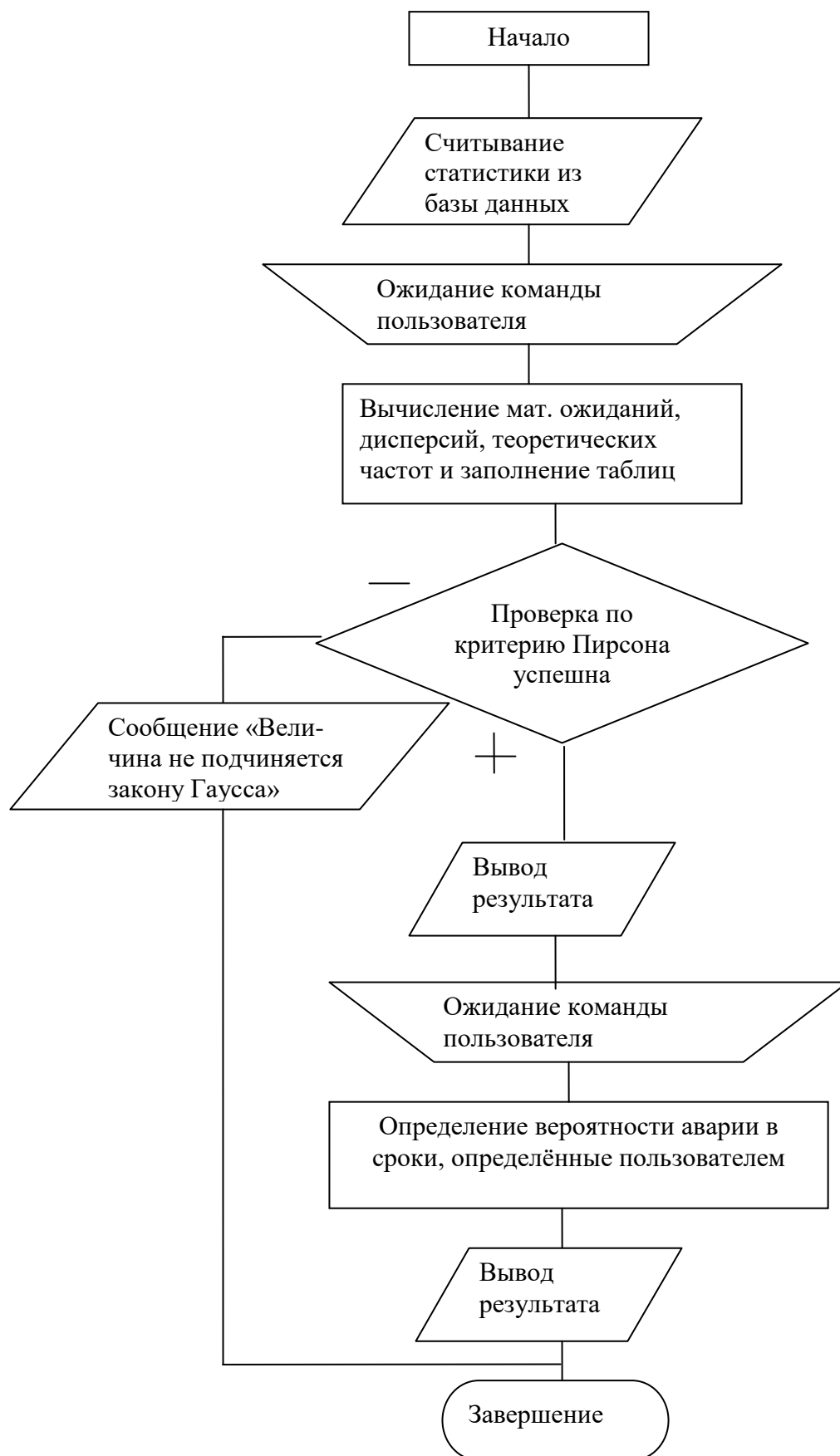
электрооборудования данного типа закону распределения случайной величины (нормальному, по Пуассону или другим);

3) при положительном результате проверки расчёт вероятности прогнозируемого времени безаварийной работы данного типа электрооборудования и времени его ремонта в случае отказа.

Данные об отказах электрооборудования вводятся в компьютер диспетчерской службой. Предварительно массив данных об отказах, их причинах, времени устранения аварий, проведенных текущих и капитальных ремонтах, времени, затраченном на соответствующий ремонт в человеко-часах, формируется на основании записей в журналах диспетчеров за предыдущие годы эксплуатации электрооборудования. При недостатке или полном отсутствии зафиксированных статистических данных можно в начале эксплуатации разрабатываемой системы прогнозирования воспользоваться статистикой по другим районам. Далее такие данные вводятся в компьютер по мере появления.

Проверка гипотез о законе распределения. Закон распределения исследуемой случайной величины неизвестен, т.е. является гипотезой, которая требует статистической проверки. В исследуемом случае возможно, что случайная величина подчиняется закону распределения Пуассона, либо нормальному закону распределения.

Обозначим через X исследуемую величину. Требуется проверить гипотезу H_0 о том, что эта случайная величина подчиняется закону распределения $F(x)$. Для проверки гипотезы произведем выборку, состоящую из n независимых наблюдений над случайной величиной X . Построим эмпирическое распределение $F^*(x)$ исследуемой случайной величины. Сравнение эмпирического $F^*(x)$ и теоретического распределений производится с помощью специально подобранной случайной величины – критерия согласия. Существует несколько критериев согласия: χ^2 Пирсона, Колмогорова, Смирнова и др. Используем для нашего случая критерий согласия χ^2 Пирсона, как наиболее часто употребляемый критерий для проверки гипотезы о законе распределения. Таблица статистических наблюдений вводится наряду с другими таблицами и используется программой для проверки гипотезы. База данных программы – файл «Control.mdb» – имеет расширение «.mdb» и создана в СУБД MS Access. Это сделано для удобства пополнения и обновления БД, так как MS Access является достаточно распространенной и доступной СУБД. Алгоритм системы представлен на рисунке.



Блок-схема алгоритма решения задачи при заданной гипотезе:
нормальный закон распределения

Для определения срока очередного ремонта (или оценки состояния) использованы выражения для расчета вероятности попадания случайной (нормально распределенной) величины в заданный интервал:

$$P(a_1 \leq X < a_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{z_1}^{z_2} e^{-z^2/2} dz = \Phi(z_2) - \Phi(z_1),$$

где $(a_1 \dots a_2)$ – пределы колебания сроков ремонта (осмотра); $z = (a - M)/\sigma$; M – математическое ожидание срока ремонта; σ – стандартное отклонение; Φ – интеграл вероятностей.

Например, сценарий вычисления очередного срока ремонта выглядит так:

1. Обращение к базе данных «Статистические данные»

X_1, X_2, X_3, \dots

2. Определение статистического математического ожидания M .

3. Определение дисперсии σ^2 .

4. Определение стандартного отклонения σ .

5. Определение вероятностей попадания прогнозируемого срока эксплуатации трансформатора в заданный интервал производится на основании известных из теории вероятностей выражений:

$$P_1(a_1 \leq X < a_2) = \Phi((a_2 - M)/\sigma) - \Phi((a_1 - M)/\sigma),$$

$$P_1(a_3 \leq X < a_4) = \Phi((a_4 - M)/\sigma) - \Phi((a_3 - M)/\sigma),$$

...

задаваясь величинами $(a_1 \dots a_2)$, $(a_3 \dots a_4)$ и т.д.

Величины « Φ » вычисляются по таблице интегралов вероятностей в базе данных.

6. Сравнение величин полученных вероятностей попадания в заданный интервал, выбирается интервал, вероятность которого максимальна.

Библиографический список

1. Олемаев, В.В. Теория вероятностей и математическая статистика / В.В. Олемаев, В.С. Калинина. М.: ЮНИТИ-ДАНА. 2009.

2. Математическая статистика: учебник для вузов; под ред. А.М. Дина. М.: «Высшая школа». 1975.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

Для уменьшения затрат при испытании электрооборудования на надежность и ускорении ввода новых образцов в производство необходимо сокращать время испытаний. Но при этом снижается точность оценок параметров выбранного закона распределения и, соответственно, рассчитанных показателей надежности. Избежать этого можно путем разработки более точных методов оценок параметров распределения.

В работе выполнены экспериментальные исследования точности оценок максимального правдоподобия (МП) по малым, многократно цензурированным справа выборкам для трех законов распределения: экспоненциального, Вейбулла, логарифмически нормального.

На ЭВМ генерировались многократно цензурированные справа выборки случайных величин объемом $N = 4, 10, 15, 25$. Количество сформированных выборок для каждого значения N равно 3000. По каждой выборке методом максимального правдоподобия рассчитывались оценки параметров исследуемых законов распределения и их относительные отклонения δ от истинных значений, которые использовались при генерации выборки. Весь диапазон относительных отклонений δ был разбит на интервалы. Для каждого интервала рассчитано количество оценок, в процентах от общего числа, для которых величина δ принадлежит данному интервалу. Полученные результаты для экспоненциального распределения приведены на рис. 1.

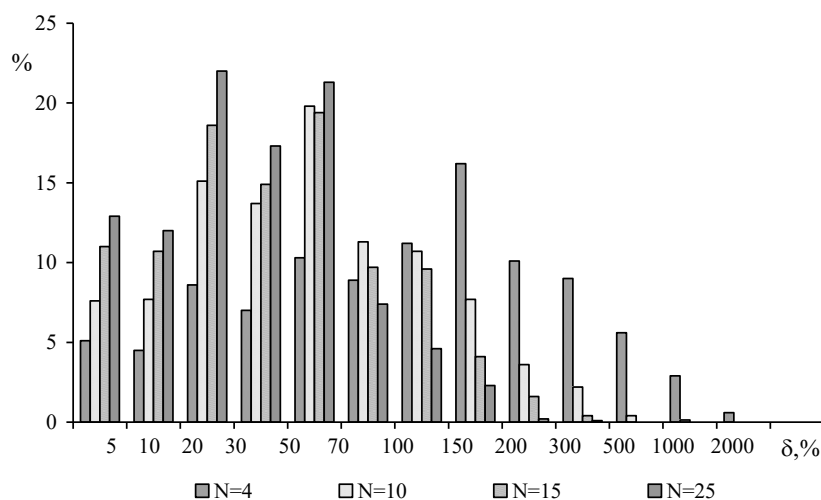


Рис. 1. Точность оценки МП экспоненциального закона распределения

Эти экспериментальные данные показывают, что большинство оценок максимального правдоподобия, полученные по малым, многократно цензурированным справа выборкам имеют значительные отклонения от истинных значений. Например, 16% оценок экспоненциального распределения при $N = 4$ имеют относительные отклонения от 100 до 150%; 10% – относительные отклонения от 150 до 200%; 9% – от 200 до 300%; 3% – от 500 до 1000%. С увеличением объема выборки точность оценок возрастает. При $N = 25$ относительные отклонения оценок экспоненциального закона распределения не превышают 150%. Несмотря на это, 17% оценок имеют относительные отклонения от 20 до 30%; 21% – от 30 до 50%; 7,5% – от 50 до 70%; а 5% – 100 до 150%.

Для параметра масштаба распределения Вейбулла 58% оценок при $N = 4$ имеют относительные отклонения от 30 до 50%; 20% – относительные отклонения от 50 до 100% и 29 – более 100%. С увеличением объема выборки точность оценок возрастает. При $N = 25$ относительные отклонения оценок закона распределения Вейбулла практически не превышают 100%. Несмотря на это, 12% оценок имеют относительные отклонения от 20 до 30%; 14% – от 30 до 50%; 7% – от 50 до 70%; 3% – от 70 до 100%. Еще более низкую точность имеют оценки параметра формы закона распределения Вейбулла. Для $N = 4$ 18% оценок имеют отклонения от 30 до 50%, а 41% – от 50 до 100%.

Для логнормального распределения 25% оценок параметра формы при $N = 4$ имеют относительные отклонения от 30 до 50%; 23% – относительные отклонения от 50 до 70%; 17% – от 70 до 100%. С увеличением объема выборки точность оценок возрастает. При $N = 25$ относительные отклонения оценок экспоненциального закона распределения не превышают 70%. Несмотря на это, 21% оценок имеют относительные отклонения от 19 до 30%; 20% – от 30 до 50%; 5% – от 50 до 70%. Более высокую точность имеют оценки параметра масштаба логарифмически нормального распределения. Для $N > 4$ их относительные отклонения от истинного значения не превышают 50%, а для $N = 4$ – 70%.

В целом можно сделать вывод, что точность метода максимального правдоподобия при значениях $N < 50$ низка. Относительное отклонение оценок от истинных значений может достигать 200% и более, а половина всех оценок имеет отклонения больше 30% в зависимости от объема выборки.

В ряде работ [1, 2, 3] проведены исследования, позволяющие установить зависимость точности оценки параметров законов распределения, полученных методом максимального правдоподобия, в зависимости от отдельных характеристик выборки наработок на отказ оборудования. В публикации [1] авторами проанализирована зависимость смещения оценок закона распределения Вейбулла от степени цензурирования выборки.

В результате исследований получены зависимости смещения математического ожидания оценки МП от объема выборки N , коэффициента вариации V и степени усечения q . В работе [1] предложен способ введения поправок к оценке МП. Для заданных величин N , V и q по полученным зависимостям определяется смещение $\delta_{\text{см}}$ оценки МП p' . Несмещенную оценку p'_n получают по формуле
$$p'_n = \frac{p}{1 + \delta_{\text{см}}}.$$

В перечисленных работах рассматривается влияние на точность оценки максимального правдоподобия небольшого количества (одного – двух) параметров выборки, что не позволяет глубоко изучить зависимость точности оценки максимального правдоподобия от структуры выборки. При этом дополнительная информация об оценке параметров распределения, содержащаяся в структуре выборки, используется незначительно.

Цель проведенных исследований в общем виде можно сформулировать следующим образом: получение математических моделей, устанавливающих связь между относительным отклонением оценок МП от истинного значения параметров функции распределения и параметрами, характеризующими структуру выборки.

Решение поставленной задачи осуществлялось в два этапа:

1. Моделирование на ЭВМ многократно цензурированных справа выборок случайных величин, распределенных по исследуемым законам, и расчет параметров выборки, характеризующих ее структуру. Для описания структуры сформированной выборки случайных величин в работе использовались двадцать семь параметров. В качестве шести параметров предложены стандартные характеристики выборки: степень цензурирования, коэффициент вариации, эмпирический коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса [4]. Еще семь параметров представляют собой математические выражения, составленные из стандартных характеристик выборки. Остальные четырнадцать параметров разработаны в процессе исследования. Все параметры измеряются в относительных единицах и не зависят от абсолютных значений случайных величин. Этим достигнута адекватность уравнений регрессии, полученных в эксперименте на ЭВМ с уравнениями регрессии, описывающими аналогичные зависимости для совокупности выборок наработок на отказ оборудования.

2. Расчет оценок максимального правдоподобия и их относительных отклонений от истинного значения. Построения математических зависимостей между относительным отклонением оценок МП исследуемых законов и параметрами выборки. Для построения математических моделей использовался регрессионный анализ.

Относительные отклонения δ рассчитывались следующим образом:

$$\begin{cases} p'_i > p_i, & \delta_i = \frac{p'_i}{p_i} \\ p'_i < p_i, & \delta_i = \frac{p_i}{p'_i} \end{cases}, \quad (1)$$

где p_i – истинное значение параметра распределения; p'_i – оценка максимального правдоподобия параметра распределения; где δ_i – относительное отклонение оценки МП параметра закона распределения от истинного значения, рассчитанное для i -й сформированной выборки; i – номер сформированной выборки.

Как показали экспериментальные исследования, при $N > 50$ уравнения регрессии являются незначимыми. При $N < 4$ информации, содержащейся в цензурированной выборке, недостаточно для расчета достоверных оценок МП, в том числе и с учетом введения поправок к оценкам. С учетом этого в проведенных исследованиях генерировались выборки объемом $N = 4 - 20, 25, 30, 35, 40, 50$.

Исследования также показали, что значимость регрессионных уравнений сильно зависит от степени цензурирования выборки q . При малых значениях q ($N = 6, q = 0,167; q = 0,133; N = 10, q = 0,1; q = 0,2$) уравнения регрессии малозначимы и неэффективны. Исходя из этого, для построения полученных в работе уравнений регрессии использовались смоделированные на ЭВМ многократно цензурированные выборки, в которых степень усечения q выборки изменяется в следующих пределах:

$$\begin{aligned} 6 \leq N < 10, & \quad q \geq 0,5, \\ 10 \leq N < 20, & \quad q \geq 0,3, \\ 20 \leq N \leq 50, & \quad q \geq 0,2. \end{aligned}$$

В результате исследований были построены линейные уравнения регрессии, устанавливающие зависимость между параметрами, характеризующими структуру выборки, и относительным отклонением оценок МП для исследуемых законов распределения.

В исследованиях была проведена оценка эффективности построенных уравнений регрессии. Для каждой выборки по уравнениям регрессии были рассчитаны поправки к оценке МП и конечная оценка параметра распределения по выражению

$$p'_{ki} = p'_i \cdot \bar{y}(x_i),$$

где p'_{ki} – конечная оценка параметра распределения; $\bar{y}(x_i)$ – относительное отклонение оценки МП параметра функции распределения от истинного значения, рассчитанное по уравнению регрессии.

Результаты исследований эффективности применения построенных уравнений регрессии для исследуемых законов распределения показаны на рис. 2 – 6.

Из графиков видно, что после введения поправки средние

относительные отклонения оценок МП от истинного значения параметров распределения не превышают 20 – 30 %, в то время как начальные отклонения могут достигать 120%. Поэтому можно сделать вывод о том, что применение разработанной методики позволяет повысить точность оценок максимального правдоподобия в 1,5 – 3 раза, в зависимости от параметра закона распределения и объема выборки.

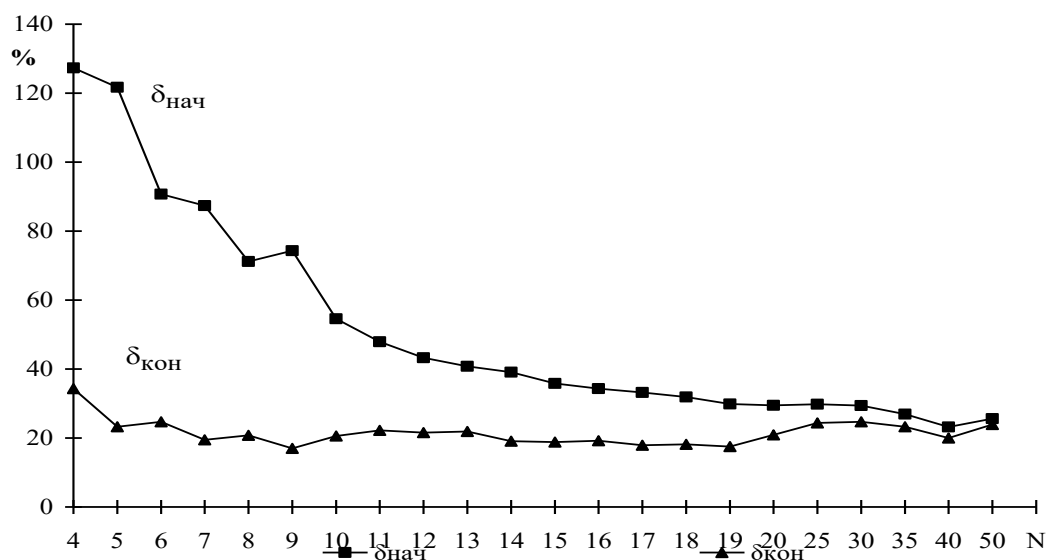


Рис. 2. Средние относительные отклонения начальных и конечных оценок МП

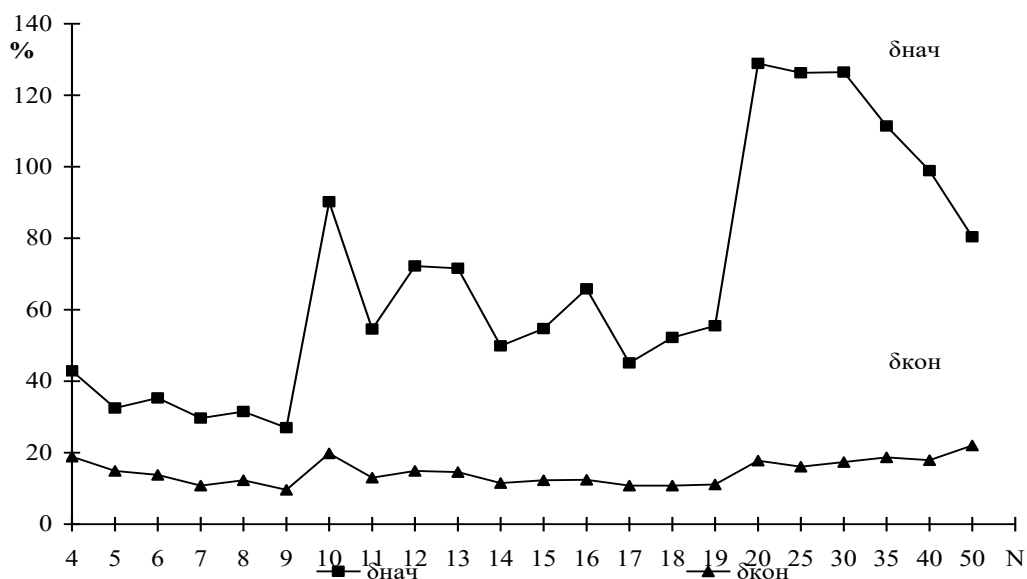


Рис. 3. Закон распределения Вейбулла. Параметр масштаба

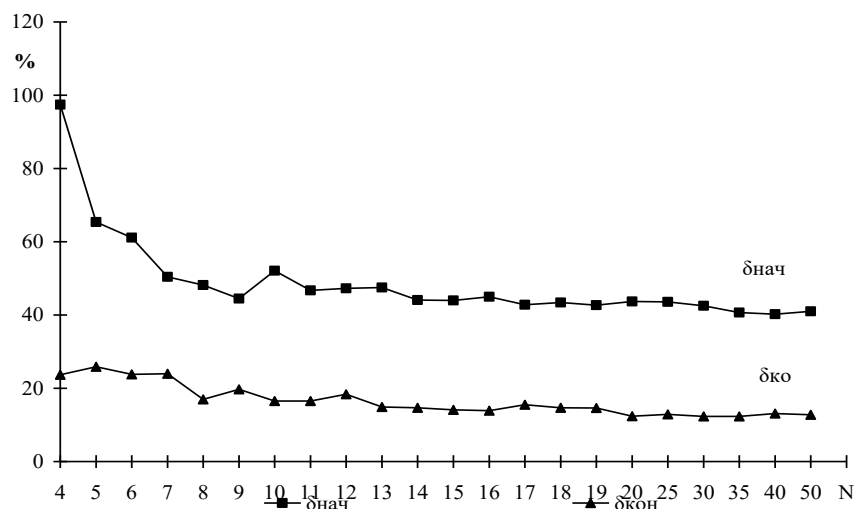


Рис. 4. Закон распределения Вейбулла. Параметр формы

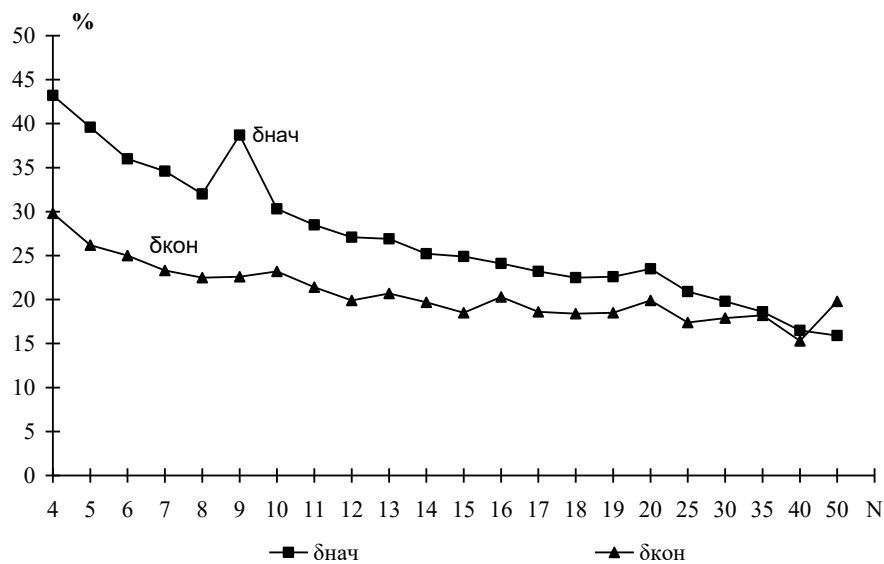


Рис. 5. Логнормальный закон распределения. Параметр формы

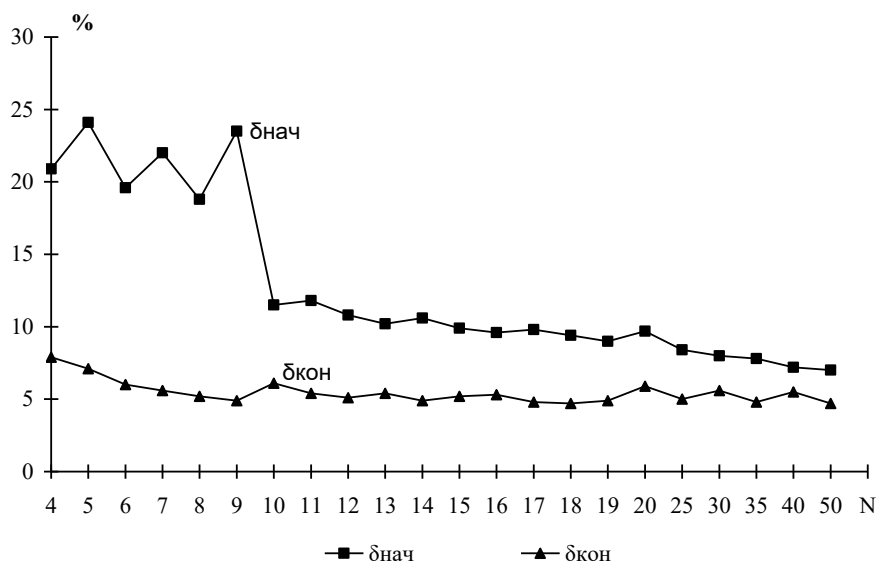


Рис. 6. Логнормальный закон распределения. Параметр масштаба

Библиографический список

1. Баталова, З.Г. О точности оценок ресурсов элементов изделий методом максимума правдоподобия при случайном усечении длительностей наблюдений / З.Г. Баталова, Ю.Н. Благовещенский // Надежность и контроль качества. 1979. № 9. С. 12-20.
2. Бурдасов, Е.И. Об оценке параметров нормального распределения по случайно цензурированной выборке / Е.И. Бурдасов, И.Д. Зарифьянц, Н.Н. Дворникова // Надежность и контроль качества. 1978. № 6. С. 10-16.
3. Бурдасов, Е.И. Исследование оценок параметров распределений при анализе результатов незавершенных испытаний / Е.И. Бурдасов, И.Д. Зарифьянц, Н.Н. Дворникова, И.З. Аронов // Надежность и контроль качества. 1980. № 12. С. 47-55.
4. Петрович, М.Л. Статистическое оценивание и проверка гипотез на ЭВМ / М.Л. Петрович, М.И. Давидович. М.: Финансы и статистика. 1989. 189 с.

Киселев А.Н., Громилин В.А.

Тверской государственный технический университет,
ОАО «Тверьэнерго»

СОСТОЯНИЕ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТВЕРЬЭНЕРГО. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Учет электроэнергии является одним из наиболее важных процессов, связанных с передачей электроэнергии. Эффективность работы любой электросетевой компании напрямую зависит от качества функционирования системы учета. В отличие от предприятия любой другой отрасли, для которого электроснабжение лишь один из вспомогательных процессов, обеспечивающих основное производство, передача электроэнергии для сетевой компании является основным видом деятельности¹. По этой причине учет электроэнергии для неё не просто группа счетчиков, по которым несколько раз в месяц, вручную или автоматизированно, снимаются показания, а целая система со своими законами и правилами функционирования.

Система учета электроэнергии предназначена для определения основных производственных показателей сетевой компании:

- 1) поступление электроэнергии в сеть;
- 2) объем электроэнергии, отпущенной потребителям;

¹ Вторым основным видом деятельности является технологическое присоединение, которое напрямую к теме данной статьи отношения не имеет.

3) потери электроэнергии в сети.

Данные показатели представляют собой баланс электрической энергии: потери в сети образуются как разница между объемами поступившей электроэнергии и отпущенной потребителям. Из этого следует, что основной показатель эффективности работы электросетевой компании – величина потерь электрической энергии в сети – определяется состоянием учета электроэнергии.

Рассмотрим структуру учета электроэнергии по указанным показателям:

I. Учет поступления электроэнергии в сеть:

- 1) из ЕНЭС² (ОАО «ФСК ЕЭС»);
- 2) от генерирующих компаний оптового рынка (ОАО «Енал-ОГК № 5» – Конаковская ГРЭС, ОАО ТГК № 2 – ТЭЦ г. Твери и В. Волочка);
- 3) из сетей смежных РСК (МОЭСК, Смоленскэнерго, Псковэнерго, Новгородэнерго, Ярэнерго);
- 4) от объектов розничной генерации (Новотверецкая ГЭС, газокompрессорные станции).

II. Учет отпуска электроэнергии из сети:

- 1) потребителям (энергосбытовым компаниям) – субъектам ОРЭ;
- 2) в сети территориальных сетевых организаций (розничный рынок);
- 3) потребителям гарантирующих поставщиков (розничный рынок);
- 4) крупным потребителям, с установленной мощностью более 750 кВА;
- 5) потребителям – гражданам;
- 6) прочим потребителям.

Средства учета электроэнергии по внешним границам Тверьэнерго расположены в основном на объектах смежных субъектов. В первую очередь это подстанции ЕНЭС и генерирующие станции. По границам со смежными РСК расчетный учет установлен в равной мере на объектах Тверьэнерго и объектах смежных компаний. Точки поставки электроэнергии по границам РСК совпадают с точками покупки электроэнергии гарантирующим поставщиком на оптовом рынке, в связи с чем система учета электроэнергии должна в полной мере удовлетворять требованиям ОАО «АТС» [1]. Данные требования предусматривают создание в точках поставки на ОРЭ АИИС КУЭ. Обязательства РСК оборудовать соответствующей системой учета точки покупки на ОРЭ гарантирующих поставщиков предусмотрены действующим законодательством [2, 3].

В целях приведения системы учета по границам РСК в соответствие требованиям ОРЭ в Тверьэнерго начиная с 2005 года реализуется

² Единая национальная электрическая сеть, находящаяся в управлении ОАО «ФСК ЕЭС».

программа модернизации АИИС КУЭ. В 2010 году планируется ее завершение сдачей АИИС КУЭ в эксплуатацию ОАО «АТС».

АИИС КУЭ Тверьэнерго построена на базе счетчиков СЭТ.4ТМ и контроллеров СИКОН. Верхний уровень АИИС – ИКМ «Пирамида». Наиболее слабым местом системы в настоящее время являются каналы передачи данных. Система функционирует на каналах GSM, предусмотренных проектом в качестве резервных. Низкая пропускная способность данных каналов значительно снижает производительность системы и не позволяет в полной мере реализовать ее функциональность. В перспективе планируется организовать выделенные каналы до каждой подстанции на базе оптоволоконных линий связи, что позволит в комплексе решить задачи связи, телемеханизации управления и передачи данных. Работа в данном направлении ведется уже несколько лет, однако ввиду высокой стоимости число подстанций, на которых организованы высокоскоростные каналы передачи данных, пока небольшое. В процессе модернизации АИИС КУЭ также было заменено и вновь установлено большое количество измерительных трансформаторов тока и напряжения.

В состав системы входит всего 10 расчетных точек учета и 160 контрольных. Количество точек постоянно меняется в связи с развитием сети и выходом на ОРЭ новых потребителей. Информация с расчетных точек, расположенных на объектах смежных субъектов, поступает в систему в автоматическом режиме в формате XML 80020.

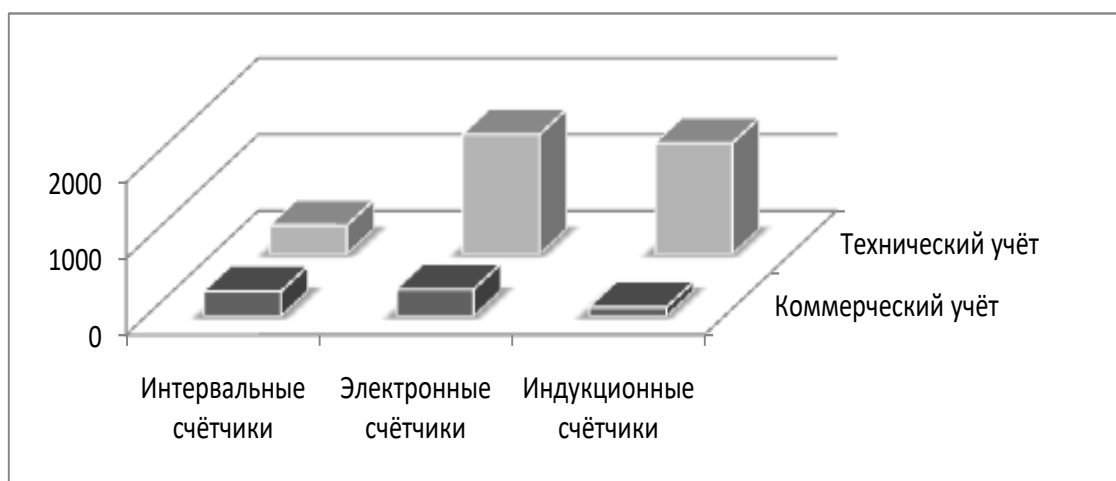
Уже сегодня, с учетом замещающей информации смежных субъектов, АИИС КУЭ Тверьэнерго позволяет оперативно контролировать перетоки по всем внешним границам энергосистемы. Кроме того, в систему поступают данные от АИИС КУЭ потребителей – субъектов ОРЭ.

На сегодняшний день с точки зрения важности задачи и сложности ее решения на первый план выступает модернизация учета отпущенной из сети электроэнергии (учет на розничном рынке). В отличие от оптового рынка, где количество точек учета составляет несколько сотен, количество точек учета в розничном сегменте составляет порядка 28 тысяч по юридическим лицам и порядка 300 тысяч по населению. Именно в этой области сосредоточены как основные проблемы, так и перспективные пути их преодоления.

Основные проблемы связаны с несовершенством нормативно-технической и правовой базы. До сих пор отсутствуют утвержденные правила коммерческого учета электроэнергии на розничном рынке, что порождает большое количество конфликтных ситуаций между смежными субъектами. Технические требования к учету также формализованы недостаточно. Не реализованы требования законодательства о переходе на общедомовой учет по многоквартирным домам [4]. В отсутствии необходимой законодательной основы складывается ситуация в которой система учета функционирует в рамках договоренностей, достигнутых

между электросетевыми и энергосбытовыми организациями. В случаях, когда таких договоренностей достичь не удастся – возникают конфликты, которые, к сожалению, для Тверской области не являются редкостью, а их разрешение иногда невозможно достичь даже в судебном порядке.

С точки зрения инструментального обеспечения системы учета «Тверьэнерго», как и многие другие сетевые компании, столкнулась с проблемой устаревания парка измерительных приборов, вызванной нехваткой финансовых средств для полномасштабного обновления оборудования. Информация о составе парка приборов учета приведена на рисунке. Как видно из диаграммы, устаревшие индукционные счетчики еще имеют недопустимо высокую долю в общем объеме приборов. На сегодняшний день учет в полном объеме не автоматизирован ни на одной из подстанций. Большую проблему представляет отсутствие технического учета на ТП 6-10 кВ, что не позволяет качественно составлять пофидерные балансы для анализа потерь. В данном направлении «Тверьэнерго» в ближайшие годы планирует полностью перенести учет на подстанциях интервальными счетчиками и в последующем приступить к автоматизации учета.



Парк счетчиков на подстанциях Тверьэнерго

Сегодня на подстанциях «Тверьэнерго» эксплуатируются интервальные счетчики следующих модификаций: Меркурий 230 ART, ЦЭ6850М, Протон-К, Альфа (различных модификаций, в основном принадлежащие абонентам). Все они в достаточной мере функциональны и надежны, однако опыта их эксплуатации в составе АИИС в РСК не имеется.

Кроме приборов учета электроэнергии на собственных объектах, Тверьэнерго эксплуатирует огромный парк счетчиков бытовых потребителей. В последнее время наиболее перспективным мероприятием в данном секторе потребления считается установка выносных шкафов

учета как единственное, реально действенное мероприятие в борьбе с хищением электроэнергии. Шкафы учета ежегодно устанавливаются в количестве нескольких тысяч, но этого количества пока не хватает даже для покрытия «проблемных» зон. Рассматриваются также альтернативные проекты, в частности имеется опыт создания АСКУЭ бытовых потребителей, но данное мероприятие пока не находит широкой реализации в первую очередь из-за сложностей в эксплуатации системы и нехватки квалифицированного персонала.

Основной проблемой метрологического обеспечения учета электроэнергии также являются устаревшие счетчики низкого класса точности. Не менее важной проблемой являются перегруженные трансформаторы напряжения, работающие не в классе точности 0,5, встроенные трансформаторы тока с классом точности 3,0, а также включение счетчиков в обмотку релейной защиты. К сожалению, проблему можно решить только заменой оборудования (установкой дополнительных ТН). Кроме того, большое количество измерительных трансформаторов не проходит очередную метрологическую поверку.

Программное обеспечение системы учета электроэнергии в «Тверьэнерго» реализовано на базе платформы SAP R3 в модуле ISU. Внедрение данного модуля началось два года назад с юридических лиц, сегодня в модуль заносится база по населению. Данный модуль позволяет формировать объем переданной электроэнергии по уровням напряжения и группам потребителей в разрезе структурных подразделений сетевой компании, вести базу по проверкам приборов учета, учету установленных пломб, формировать всю необходимую отчетность. Однако главным достоинством системы SAP можно считать связь ее различных модулей, что позволяет автоматически фактурировать объемы переданной электроэнергии (выставлять счета), а также привязать учет к техническому месту в электрической сети (модуль ТОРО) для формирования балансов всех уровней. Сегодня объем переданной потребителям электроэнергии формируется в модуле ISU в каждом РЭС Тверьэнерго. Основными проблемами работы модуля являются:

- сложный интерфейс с большим количеством непонятных терминов и обозначений не характерных для электроэнергетики в привычном понимании этого слова;
- работа по сети с удаленным сервером, что обуславливает низкую скорость ввода и обработки информации;
- несовершенная база по потребителям, что вызвано сжатыми сроками ввода данных с потерей качества информации, отсутствие привязки к техническим местам в сети.

В настоящее время в «Тверьэнерго» идет постоянная работа по совершенствованию базы в ISU и исправлению ошибок, также программа постоянно наполняется новым функционалом, к которому уже можно

отнести составление пофидерных балансов и балансов по подстанциям, формирование маршрутных листов для снятия показаний бытовых потребителей и др.

Основные направления развития системы учета электроэнергии на ближайшую перспективу:

- сдача в промышленную эксплуатацию АИИС КУЭ по внешним границам энергосистемы и развитие ее функционала;
- модернизацию учета электроэнергии на подстанциях с установкой интервальных счетчиков с последующей интеграцией в АИИС;
- установка счетчиков технического учета на вводах 0,4 кВ ТП 6-10 кВ;
- метрологическая поверка и замена в случае непригодности измерительных трансформаторов тока и напряжения.
- отладка механизма формирования объемов переданной электроэнергии конечным потребителям, с оформлением необходимых регламентов в виде приложений к договорам на услуги по передаче электроэнергии со сбытовыми компаниями;
- выверка базы данных по потребителям в ISU и привязка точек учета к электрической схеме для формирования и анализа балансов по фидерам и ТП 6-10 кВ.

Следует подчеркнуть, что только в случае выполнения всех данных мероприятий сетевая организация получит реально действующий инструмент для начала системной, аналитической работы по выявлению очагов нетехнических потерь.

Библиографический список

1. Правила функционирования розничных рынков электрической энергии в переходный период реформирования электроэнергетики (утверждены ПП РФ №530 от 31 августа 2006 г.).
2. ПП РФ от 31 августа 2006 г. №529 «О совершенствовании порядка функционирования оптового рынка электрической энергии (мощности)».
3. Приложение 11.1 к Положению о порядке получения статуса субъекта оптового рынка и ведения реестра субъектов оптового рынка. Автоматизированные информационно-измерительные системы коммерческого учета электрической энергии (мощности). Технические требования.
4. ПП РФ от 23 мая 2006 г. №307 «О порядке предоставления коммунальных услуг гражданам».

Маринова С.В., Киселев А.Н.

Тверской государственный технический университет

ВЫБОР ТАРИФА ПРИ РАСЧЕТЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЗА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

Плановая постепенная либерализация рынка электроэнергии каждый год остро ставит проблему увеличения оплаты за электроэнергию и связанную с этим задачу выбора тарифа.

С 1 июля 2009 г. в соответствии с приказом ФСТ России в Тверской области расчеты по числу часов использования мощности (ЧЧИМ) пришли на смену среднего одноставочного (базового) тарифа. Использование тарифа в зависимости от ЧЧИМ теперь является безальтернативным для потребителей, ранее рассчитывавшихся по среднему одноставочному (базовому) тарифу. До этих пор использование расчетов в зависимости от ЧЧИМ осуществлялось на основе дополнительного соглашения между энергосбытовой компанией и потребителем, тогда как многие субъекты Российской Федерации перешли на такую систему оплаты еще с 2005 года.

Число часов использования заявленной мощности – это показатель, означающий время, которое должен проработать потребитель с нагрузкой, соответствующей этой самой заявленной мощности.

Дело в том, что потребление электроэнергии, также как и ее выработка, происходит неравномерно во времени. Чем больше колебаний в нагрузке, тем дороже производителям электроэнергии обходится её выработка и, естественно, растет её цена для потребителей. Чтобы энергосистема работала наиболее эффективно, а потребители электроэнергии платили меньше, в энергосистеме должно быть как можно меньше колебаний. Для этого потребители должны постоянно работать с равномерной нагрузкой. Эта нагрузка рассчитывается как среднее из наибольших значений электрической мощности, расходуемой нагрузкой в часы максимальной нагрузки энергосистемы за все рабочие дни в году.

Рассмотрим, как и по каким методикам принимается показатель ЧЧИМ для тех или иных потребителей сбытовыми компаниями.

Методика отнесения потребителей к тем или иным группам в зависимости от их функционирования (например, деревообработка, выпуск стеклотары, текстильная промышленность) изложена в приказе ФСТ России № 20-э/2 от 06.08.2004 г. В соответствии с ней гарантирующий поставщик должен разделить потребителей на те или иные группы и применять различные тарифы в зависимости от диапазона ЧЧИМ. Для начала гарантирующий поставщик должен определить такие группы. Как

это сделать и сколько их должно быть, нигде не указано, поэтому было использовано распределение промышленности по аналогии с Росстатом, т.е. по ОКВЭД – Общероссийский классификатор экономических видов деятельности (Russian Classification of Economic Activities).

Далее для каждой группы составляют представительную выборку из репрезентативных (среднестатистических) компаний из числа своих потребителей из разных отраслей промышленности. По каждой компании была рассмотрена такая информация, как вид выпускаемой продукции; коэффициент сменности; основные направления использования электроэнергии; суточный график электрической нагрузки в день годового максимума совмещенного графика нагрузки ОЭС (зимний режимный день, в отдельных случаях может быть летний режимный день); годовой объем электропотребления.

Все эти факторы у всех потребителей в одной группе должны быть идентичными или весьма схожими. В противном случае выборка не является репрезентативной.

Далее гарантирующий поставщик определил нагрузку в отчетные часы утреннего и вечернего пика (максимума) по каждому потребителю из выборки в суточном графике, выбрал из этих двух цифр наибольшую. Посредством деления суммарного годового электропотребления всех потребителей, вошедших в выборку, на их совмещенный максимум нагрузки (сложенный алгебраически) определили среднегодовое число часов использования максимума нагрузки рассматриваемой группы потребителей. Диапазон из числа указанных в пункте 64 Методических указаний (приказ ФСТ России № 20-э/2 от 06.08.2004 г), в который попадает расчетная величина, и будет ЧЧИМ для данной группы потребителей.

К такому подходу, искажающему реальную картину интересующего нас вопроса в установлении ЧЧИМ потребителя по ОКЭВД, сразу можно сделать ряд существенных оговорок. Во-первых, классификация ОКЭВД весьма укрупнена и не может отразить всех характеристик потребителя одинакового кода классификации. Особенно это касается режима электропотребления. К примеру, предприятие, первично зарегистрировавшееся по учредительным документам в налоговых органах как «строительство» имеет один режим энергопотребления, а после сдачи и функционирования этого объекта в качестве «промышленного производства» данный абонент показывает иной режим нагрузки.

Во-вторых, предприятия, имеющие один и тот же ОКЭВД, по факту имеют разные ЧЧИМ. Рассмотрим несколько предприятий, относящихся по ОКЭВД к одному и тому же виду деятельности «деревообработка, обработка древесины, пиломатериалы». Первое в рассматриваемой группе – ОАО «Деревообработчик», расположенный в г. Западная Двина Тверской

области, имеет ЧЧИМ, равное 5521,5 ч, поэтому относится к «однотарифным потребителям с дифференцированным по ЧЧИМ тарифу от 5001 до 6000 ч». Второе предприятие аналогичного вида деятельности – ПК «Максатихинский лесопромышленный комбинат», который показывает ЧЧИМ, равное 7627,7 ч, и относится к «однотарифным потребителям с дифференцированным по ЧЧИМ тарифу от 7001 до 8000 ч». В тарифах, действующих в 2009 году, разница между этими группами составляет 22%. Оба приведенных показателя ЧЧИМ были получены по данным автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ), разработанных на этих предприятиях Научно-производственным центром энергосбережения ТГТУ. Предоставленные данные АСКУЭ подтверждаются в районных отделениях сетевой компании и принимаются энергосбытовой компанией для расчетов за электропотребление предприятий.

Из приведенного выше примера видно, что самой важной задачей является определение фактической мощности потребителя. Кроме рассмотренного способа отнесения предприятия к тарифной группе по ОКЭВД, применяются еще несколько методик измерений. Самая простая – контрольные замеры фактической нагрузки в течение нескольких произвольных суток с помощью микропроцессорных приборов, устанавливаемых на расчетных точках потребителя. Такие услуги по измерениям предоставляются на коммерческой основе, полученная фактическая нагрузка принимается энергосбытовой компанией для дальнейшего расчета ЧЧИМ, хотя методика расчетов по таким данным лишена законной силы. Кроме того, у этой методики тоже есть существенный недостаток – используются измерения за небольшой текущий период, не учтена сезонность потребления, фактор стабильности производства (временные факторы и т.д.). В машиностроительной отрасли в разные сезоны (месяцы) предприятия имеют различные ЧЧИМ. В этом случае показатель ЧЧИМ, полученный по замерам нагрузки нескольких недель в году, будет резко отличаться от показателя ЧЧИМ, полученного из фактических нагрузок в течение года. А при расчёте тарифов используют годовую величину, что естественно, ведь расчётный период – календарный год. Этот механизм выравнивания нагрузки в течение суток заложен во всех тарифах. В двухтарифном – это мощность с 6 до 23 часов, в однотарифном, дифференцированном по зонам суток – часы максимума нагрузок, в однотарифном – зависимость от ЧЧИМ.

Разные показатели ЧЧИМ по сезонам и месяцам подтверждают данные таких предприятий Тверской области, как ООО «Промзавод» г. Бологое, ОАО «Нелидовский машиностроительный завод» г. Нелидово.

Другой вариант определения максимума нагрузки энергоустановок потребителя – наибольшее значение нагрузки энергоустановок потребителя (группы энергоустановок) за установленный интервал

времени (сутки, неделя, месяц, год). На основании Постановления Правительства Российской Федерации от 27.12.2004 г. № 854 «Об утверждении Правил оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике» контрольные измерения значений передаваемой мощности, нагрузок на объектах электроэнергетики производятся всеми субъектами электроэнергетики не реже двух раз в год – в третью среду июня и декабря. Годовой совмещенный максимум графика электрической нагрузки рассматривается как совокупность данных, полученных при замерах, произведенных в режимный день в декабре. По указанной федеральной методике «число часов использования мощности – отношение фактического годового объема потребления электроэнергии к фактической мощности максимальных нагрузок, определенной в соответствии с замерами в зимний режимный день по данному потребителю».

Все приведенные выше методики отнесения потребителя к соответствующему тарифу по ЧЧИМ применяются в отсутствии соответствующих приборов учета у потребителя. Эту задачу, еще одну в числе других важных, решает АСКУЭ. Эти системы позволяют регистрировать значения потребляемой мощности и тем самым контролировать ЧЧИМ за любой период. Как следствие, их использование приведёт к значительному снижению затрат на электроэнергию.

На сегодняшний день федеральное законодательство диктует потребителю рассчитываться в соответствии с определенной тарифной группой в течение всего периода тарифообразования, иными словами, календарного года. Но политика рынка электроэнергии идет по пути гибкого изменения системы оплаты и будет предусматривать возможность перехода на различные тарифы в течение года в зависимости от фактических показателей ЧЧИМ.

Именно данные такого универсального инструмента, как АСКУЭ, послужат основой для определения экономически обоснованного тарифа, учитывающего особенности каждого потребителя электроэнергии.

Библиографический список

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 27.12.2004 г. № 854 «Об утверждении Правил оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике».

2. Приказ Федеральной службы по тарифам от 21.08.2007 г. № 166-э/1 «Правила определения стоимости электрической энергии (мощности), поставляемой на розничном рынке по регулируемым ценам (тарифам)».

Тверской государственный технический университет

ПРИЧИНЫ НЕРАЗРЕШИМОСТИ УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА

Главная причина тупиковых ситуаций в физико-математических науках типа неразрешимости уравнения Шредингера или задачи о вращении твердого тела вокруг неподвижной точки – это идеалистический (абстрактно-аксиоматический) путь развития математики, завершенный теоремой Фробениуса в 1876 г., но до сих пор упорно навязываемый физикам абстрактными математиками. Новый альтернативный путь материалистического развития математики, родившийся в 1976 г., позволяет решать любые задачи физики оптимально простыми математическими инструментами, рождаемыми не из *субъективных* аксиом, а из *объективно* существующих в природе физических взаимосвязей. Здесь не создают тысячи новых гипотетических алгебр или геометрий, а однозначно находят и применяют только те математические инструменты, какими пользуется сама природа. Это превращает сложные задачи физики в элементарно простые, а неразрешимые до сих пор из-за сложности задачи достаточно просто решаемыми.

С позиций нового математического аппарата (полинарного исчисления) отлично видны недостатки прежних абстрактных математических нагромождений в физике и пути их исправления, что требует фундаментальной переработки почти всех разделов физики в сторону векторно-тензорного обобщения и значительного упрощения математических моделей.

Например, взамен неразрешимых для нелинейных задач уравнений Максвелла для описания электромагнитного поля автором найдена аналитичная система простых уравнений [1]:

$$\vec{J}_0 = \gamma \vec{E} + \frac{\partial \vec{H}}{\partial R} + \frac{\partial \vec{E}_a}{\partial t}, \quad \vec{U}_0 = \rho_0 \vec{H} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial R} + \frac{\partial \vec{\mu}_a}{\partial t} \vec{H}, \quad (1)$$

где \vec{H} , \vec{E} – векторы напряженностей магнитного и электрического полей.

Для решения неразрешимой из-за нелинейности задачи о вращении твердого тела вокруг неподвижной точки взамен шести кватернионных уравнений Эйлера найдено одно векторно-аналитическое уравнение в естественном для механики и электричества базисе $j^3=1$:

$$\vec{K} = \vec{K}_\phi + \vec{K}_\psi + \vec{K}_\vartheta = \vec{r} J_\phi \omega + \mu (J_\psi + m R^2 \cos^2 \vartheta) \vec{\omega} + \tau (J_\vartheta + m R^2) \vec{\omega} = \int \vec{M} dt. \quad (2)$$

Уравнение Шредингера удовлетворяет многоэлектронным атомам, но в принципе неразрешимо для них с позиций полинарного исчисления по трем причинам.

Причина 1. Уравнение Шредингера основано на волновом уравнении кватернионного происхождения, которое требует аналитической переработки, точнее, замене частного *одномерного* дифференцирования в форме оператора Лапласа $\nabla^2 F(\mathbf{R}) = \frac{\partial^2 F}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial Z^2}$ полной второй производной $d^2 \mathbf{F} / d\mathbf{R}^2$ *трехмерной* векторной функции $\mathbf{F}(\mathbf{R}) = T + jU + kV$ трехмерного переменного $\mathbf{R} = X + jY + kZ$ в базисе $j^3 = 1$. Такое трехмерное обобщение задачи позволяет избавиться от громоздкого математического аппарата кватернионной теории поля, применимой лишь для линейных сплошных сред. Становятся просто не нужными для физики такие инструменты, как ротор, дивергенция, градиент, векторное и скалярное произведения и прочие математические нагромождения неаналитичной (линейной) теории векторного поля кватернионного происхождения. Взамен получаем полноценное элементарно простое дифференцирование трехмерной аналитической функции трехмерного переменного по правилам дифференцирования одномерных аналитических функций. При этом трехмерные гиперкомплексные числа-векторы по своим свойствам оказываются подобными комплексным числам-векторам, что *до сих пор считалось с позиций абстрактной алгебры невозможным*. В полинарном исчислении алгебра уступает приоритет общей теории аналитических функций как математической модели объективно существующих в природе физических взаимосвязей. Алгебраические действия типа умножения – деления и прочие здесь рассматриваются как элементарно простые аналитические функции гиперкомплексного переменного.

Комплексное число имеет вещественную единицу 1 и мнимую единицу i , описываемую базисным уравнением вида $i^2 = -1$. Базисное уравнение связывает мнимую единицу с вещественной. Гиперкомплексное число содержит одну вещественную единицу и несколько мнимых единиц. Полинарное число – это такое гиперкомплексное число, которое имеет количество базисных уравнений связи с вещественной единицей, равное числу мнимых единиц. При таком определении полинарных чисел отпадает необходимость изучать их коммутативность, ассоциативность, наличие делителей нуля и пр. Все полинарные числа аналитичны. Но правила вычисления аналитических функций определяются уже не их алгебраическими свойствами, а комплектом базисных уравнений. Если есть какие-либо вопросы по алгебре или геометрии полинарных чисел, то на все вопросы несложно найти однозначные ответы из общей теории аналитических функций полинарного переменного.

Алгоритм вычисления функции полинарного аргумента содержит три этапа:

- вычисление изображений аргумента с помощью корней базисных уравнений;

- вычисление заданной функции для каждого комплексного или вещественного изображения;
- вычисление координат оригинала с помощью обратных преобразований координат.

Действия алгебры, задачи геометрии, векторные диаграммы, модули, конформные отображения и другие аналоги математики вещественных или комплексных чисел однозначно находят по этому алгоритму как частные случаи соответствующих аналитических функций.

Не следует пытаться втискивать в прокрустово ложе алгебраических абстрактных поличисел типа H_3 или H_4 конкретные для конкретного раздела физики полинарные числа, чтобы представить преимущества полинарных чисел как достижения абстрактной алгебры.

Аксиоматическая алгебра и полинарное исчисление стоят по разные стороны баррикады.

Аксиомы и их бесчисленные алгебры – это продукты идеализма в науке. Полинарное исчисление – это достижение материализма в математическом моделировании физических явлений. *В полинарном исчислении на первом месте – конкретная физика природных взаимосвязей*, из которых *однозначно* определяют базисные уравнения аналитической замкнутости и алгоритм точного вычисления любой аналитической функции естественного для заданной взаимосвязи входных и выходных физических переменных в виде гиперкомплексных чисел-векторов. В абстрактной алгебре под H_3 понимают трехмерное гиперкомплексное число без какого-либо физического содержания. В полинарном исчислении для разных физических задач можно найти разные виды трехмерных гиперкомплексных чисел векторного или тензорного типов с разными свойствами. Поэтому абстрактный подход к изучению в одном классе совершенно разных объектов представляется физически безграмотным, не имеющим ничего общего с реальным физическим миром. То же можно сказать и об абстрактном (без конкретизации объективно существующих в природе физических взаимосвязей) поиске различных геометрий или их норм, модулей. В полинарном исчислении из физической неоднотонной взаимосвязи рождается единственный базис алгебраического гиперкомплексного числа-вектора, каким пользуется сама природа независимо от человека и его мыслей.

Одновременно этот же базис является геометрическим естественным репером, т.е. позволяет выполнять любые геометрические или тригонометрические действия, строить векторные диаграммы, применять метод Д-разбиения для настройки векторных величин многомерных систем управления или конформные отображения, подобные комплексным числам. Например, Н.Е. Жуковский применил комплексные числа для вычисления подъемной силы плоского сечения крыла самолета. По

аналогии трехмерные полинарные числа применимы для решения подобных задач обтекания потоками трехмерных конструкций в трехмерной сплошной среде. Поэтому каждой физической взаимосвязи соответствует ее единственно правильная геометрия, поиски которой без конкретизации, например, упругой связи в механике или гальванической связи в электротехнике также представляются не более, чем детской забавой в красивые финслероиды или кубики. Но если этим забавляются не дети, а профессора и академики, плодящие пудами бесполезную для физики наукообразную макулатуру и отклоняющие ценные идеи, то они наносят этим только вред государству.

Приведем доказательство возможности трехмерного обобщения и замены оператора Лапласа на полную вторую производную. Для этого продифференцируем аналитическую функцию $\vec{F}(\vec{R}) = T + jU + kV$ по аргументу $\vec{R} = X + jY + kZ$ в базисе $j^3 = 1, k = j^2$ и найдем условия аналитичности. Подставив в выражение $\frac{d\vec{F}}{d\vec{R}} = \frac{\partial \vec{F}}{\partial X} = \frac{\partial \vec{F}}{j\partial Y} = \frac{\partial \vec{F}}{k\partial Z}$ функцию \vec{F} , получим условия аналитичности: $\frac{\partial T}{\partial X} = \frac{\partial U}{\partial Y} = \frac{\partial V}{\partial Z}, \frac{\partial U}{\partial X} = \frac{\partial V}{\partial Y} = \frac{\partial T}{\partial Z}, \frac{\partial V}{\partial X} = \frac{\partial T}{\partial Y} = \frac{\partial U}{\partial Z}$ и разные формы выражения производной аналитической функции трехмерного переменного. Например:

$$\frac{d\vec{F}}{d\vec{R}} = \vec{F}' = \frac{\partial T}{\partial X} + j\frac{\partial T}{\partial Z} + k\frac{\partial T}{\partial Y}. \quad (3)$$

Второе дифференцирование вида $\frac{d^2\vec{F}}{d\vec{R}^2} = \frac{d\vec{F}'}{d\vec{R}} = \frac{\partial \vec{F}'}{\partial X} = \frac{\partial \vec{F}'}{j\partial Y} = \frac{\partial \vec{F}'}{k\partial Z} = \vec{F}''$ с применением разных форм дает условия аналитичности второго порядка $\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} = \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2}, \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} = \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2}, \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2}$ и выражение второй производной для одной из трех координат первообразной функции:

$$\frac{d^2\vec{F}}{d\vec{R}^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + j\frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + k\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2}. \quad (4)$$

Кубическое базисное уравнение $j^3 = 1$ имеет один вещественный корень $j_0 = 1$ и два комплексных корня $j_{1,2} = -0.5 \pm i\sqrt{3}/2$, подстановка которых в вектор-функцию (4) дает ее частные проекции на симметричные координаты пространства изображений. В частности, вещественный корень дает одномерную проекцию на равнонаклонную к осям X, Y, Z ось в виде уравнения Лапласа:

$$\frac{d^2\vec{F}}{d\vec{R}^2}_{(j=1)} = \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2}. \quad (5)$$

В волновом уравнении Даламбера и, соответственно, в уравнении Шредингера учитывается именно эта одномерная проекция. Не

учитываются две комплексные взаимно-сопряженные проекции на октаэдрическую плоскость. Учет этих недостающих компонент поля позволяет обобщить задачу на трехмерный случай с одновременным значительным упрощением ее математического аппарата. Все математические операции с полинарными числами любой сложности не отличаются от соответствующих одномерных операций. Поэтому все фундаментальные законы физики, выраженные в полинарной форме векторного или тензорного типов, почти не отличаются от их одномерных прототипов. Многомерные физические задачи упрощаются до уровня одномерных задач в буквенной форме. Более простых моделей и решений уже придумать невозможно. Остается в полученную формулу ответа подставить числовые значения координат исходных гиперкомплексных чисел-тензоров. Этот этап также легко выполнить с помощью калькулятора полинарных чисел [2]. Все гиперкомплексные числа полинарного типа аналитичны. Любые аналитические функции полинарного переменного вычисляются по приведенному выше единому простому алгоритму с помощью паритетных преобразований координат, подобных преобразованиям Лапласа.

Причина 2. Выражение константы v через полную энергию в уравнении Шредингера является аналогом для квантовых явлений баланса мощности в электротехнике. Баланс мощности в электрической цепи постоянного тока – это одномерное уравнение. Оно справедливо для схем с любым числом степеней свободы (с любым числом ветвей, узлов, источников энергии и т.д.), но в принципе не применимо для решения многомерных задач, какими являются задачи, связанные с многоэлектронными атомами. Для устранения второго препятствия есть два пути – составление системы уравнений по числу степеней свободы задачи или применение полинарных чисел-тензоров с учетом всех видов многомерных расширений. В последнем случае, кроме указанного выше трехмерного расширения надо учитывать еще ряд многомерных расширений. Из них часть связана с квантовыми числами. Это и есть вторая причина, которая может быть устранена с помощью будущей атомной математики, прототипом которой является полинарное исчисление [3 – 5].

Причина 3. В уравнении Шредингера есть еще одно многомерное расширение типа пространство–время, что позволяет заменить одноосное волновое уравнение Даламбера

$$\frac{\partial^2 F(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 F(x,t)}{\partial t^2} = 0. \quad (6)$$

на элементарное выражение полной второй производной двумерной функции двумерного пространственно-временного аргумента. Покажем это подробнее. Подобно трехмерному случаю (3) – (4) продифференцируем дважды аналитическую функцию $\bar{F} = U + iV$

бинарного переменного в базисе $\iota^2 = 1$. В работе [3] показано, что этот базис однозначно следует из уравнений Лоренца, т.е. бинарное число вида $\bar{R} = x + \iota vt$ является оптимальным числом для моделирования пространственно-временных взаимосвязей в природе. В результате получаем условия аналитичности $\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial V}{v \partial t}$, $\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial U}{v \partial t}$ и выражения производных в разных формах:

$$\frac{d\bar{F}}{d\bar{R}} = \frac{\partial U}{\partial x} + \iota \frac{\partial U}{v \partial t}, \quad \frac{d^2 \bar{F}}{d\bar{R}^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \iota \frac{\partial^2 U}{v \partial t \partial x}. \quad (7)$$

Приравнявая последнее выражение к нулю при $\iota = 1$, получаем возможность упростить выражение (6) заменой на более простую формулу в бинарных числах: $d^2 \bar{F} / d\bar{R}^2 = 0$.

Для перехода к трехмерному пространству-времени надо учесть оба эти расширения и расширения, связанные с квантовыми числами. При этом бинарный вектор превращается в многомерное гиперкомплексное число-тензор. Но эту n -мерную конструкцию нельзя назвать поличислом H_n и приписывать ей какие-либо придуманные человеком модули, нормы или правила делимости. Все аналитические правила или геометрические свойства однозначно определяются его объективно найденными в физике базисными уравнениями, количество которых равно числу мнимых единиц всех многомерных расширений.

С учетом двух рассмотренных расширений волновое уравнение в частных производных

$$\nabla^2 F(\bar{R}, t) - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 F(\bar{R}, t)}{\partial t^2} = 0$$

можно обобщить на шестимерный пространственно-временной случай и упростить до уравнения в полных производных с более простым математическим аппаратом: $d^2 \bar{F} / d\bar{R}^2 = 0$.

Полиарное исчисление, с одной стороны, это элементарно простая и аналитичная математика сложного многосвязного нелинейного мира, с другой – это математика конечномерных спектральных пакетов типа конечных рядов Фурье. Может применяться как естественная математика квантово-волновых объектов, например, как атомная математика. С применением естественных аналитических гиперкомплексных чисел (полиарного исчисления) все проблемы атомной физики станут разрешимы, и она после 80-летнего застоя может выйти на аналитичный путь дальнейшего развития при условии достойного его финансирования.

Библиографический список

1. Филинов, В.А. Общая теория электромагнитного поля для нелинейных анизотропных сплошных сред / В.А. Филинов // Проблемы энергосбережения. Тверь: ТГТУ, 2004. С. 137-146.

2. Программа для ЭВМ «Калькулятор Филинова», св-во № 990336. М.: Роспатент, 1999.

3. Филинов, В.А. Физические основы аналитического моделирования многомерных объектов / В.А. Филинов. Тверь: ТГТУ, 1995. 152с.

4. Филинов, В.А. Математическая методология научного познания фундаментальных законов многосвязной физики (путь к атомной математике и наноэнергетике): учеб. Пособие / В.А. Филинов. Тверь: Тверская областная типография, 2008. 304 с.

Филинов В.А., Карпучек А.М.

Тверской государственный технический университет

ГИПЕРКОМПЛЕКСНОЕ ОБОБЩЕНИЕ ВСЕХ ЗАКОНОВ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО, ПЕРЕМЕННОГО И НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКОВ

В июле 2009 года руководство нашей страны поставило перед учеными России задачу значительно увеличить в производстве электроэнергии долю атомной и термоядерной энергетики. Такой подход требует применения не только методов экстенсификации производства (количественного расширения объемов существующих разработок), но и методов интенсификации (развития новых теоретических разработок, исследования новых ядер, управляемых атомных и термоядерных реакций, технологий и конструкций).

И сразу, как ржавая заноза, напоминает о себе старая математическая проблема атомной физики – неразрешимость уравнения Шредингера для многоэлектронных атомов, сильно ограничивающая теоретические исследования в атомной энергетике.

В решении этой проблемы в последние годы произошел существенный сдвиг – найдены новые математические инструменты природы, пригодные в любой области физики [1 – 3], и разработана методология решения подобных неразрешимых задач [4]. Все естественные инструменты природной математики оказались аналитическими гиперкомплексными числами векторного (с одним расширением) или тензорного типов (с несколькими расширениями), т.е. многомерными числами, подобными комплексным числам. Для отличия их от искусственных гиперкомплексных чисел, создавших в физике подобные тупики в виде неразрешимых задач, новые естественные числа названы полинарными.

Так как это естественные числа природы, то как и комплексные числа изучать, развивать и совершенствовать методы решения различных

задач рано или поздно придется всем студентам и преподавателям во всех вузах мира, но сначала электрикам в том вузе, где эта математика природы найдена, т.е. в ТГТУ, затем механикам и только после этого физикам-атомщикам, объекты изучения которых обладают и электромагнитными, и механическими, и плавными (волновыми), и дискретными (квантовыми) свойствами. Полинарные числа являются логическим продолжением, естественным развитием комплексных чисел. Ставятся перед учеными более крупные и более сложные технические задачи – надо изучать, развивать и внедрять более сложные математические инструменты и методы решения новых технических задач. Символический метод расчета электрических цепей переменного тока с применением комплексных чисел был предложен американским ученым Штейнметцем в 1897 году. До этого в цепях переменного тока применяли матричный или алгебраический методы. Алгебраический метод является ответвлением, частным случаем применения матриц. В работе [3] приводится пример расчета несложной разветвленной цепи переменного тока всеми тремя методами, который наглядно демонстрирует неоспоримые преимущества комплексных чисел перед матрицами.

Комплексное число двумерно, изображается в плоских декартовых или полярных координатах и нашло применение в разных разделах физики для решения плоских задач, например, для расчета подъемной силы плоского сечения крыла самолета, для решения плоских задач механики деформируемого твердого тела и пр. Большинство физических явлений происходит в трехмерном пространстве, и для пространственных задач неоднократно предпринимались попытки найти подобные комплексным трехмерные гиперкомплексные числа. Наибольшее применение в физике нашли кватернионы – четырехмерное обобщение (точнее, удвоение) комплексных чисел [5]. На кватернионах основана практически вся теоретическая механика (ТМ) и третья часть теоретических основ электротехники (ТОЭ). Но и в ТОЭ, и в механике, а с их помощью и в атомной физике развитие науки по кватернионному сценарию зашло в тупик – привело к различным неразрешимым задачам. Оказалось, что гамильтоновы кватернионы – это искусственные гиперкомплексные числа, и для реальных задач их векторы обладают рядом существенных недостатков в сравнении с тем, что требуется от трехмерного физического числа-вектора.

Еще И. Ньютон говорил, что математика – это отражение свойств природы, но большинство математиков упорно продолжает искусственно с помощью набора аксиом **придумывать** тысячи новых гиперкомплексных систем, а потом пытаются найти им применение и подогнать их под природу. Таким кабинетным ученым нужны только карандаш и бумага. Это значительно проще и дешевле, чем что-то техническое создавать своими руками. Проще защитить диссертацию, сделать карьеру и занять

кресло у кормушки. Ньютон сам делал и полировал стекла для своего телескопа. Это титанический неблагодарный труд. Создание любого современного измерительного прибора или исследовательского комплекса требует огромного многолетнего труда коллектива, сложной электроники, лаборатории, разнообразных измерительных приборов, инструментов, приспособлений, современных справочников, помощников и многих тысяч деталей и рублей.

Автор из уважения к великому Ньютону как математику, автору дифференциального и интегрального исчисления решил сделать несколько шагов по его материалистическому пути в математике, чтобы узнать, какой математикой пользуется сама природа в механике и электричестве? Для этого был разработан и изготовлен ряд многомерных измерительных приборов с механическими взаимосвязями и несколько электронных приборов с электрическими связями [3]. Результаты этих исследований оказались ошеломляющими. Природа во всех видах движения материи пользуется одинаковой математикой, а люди описывают электричество и механику разными неправильно придуманными инструментами и после этого пытаются их объединить общими формулами. За истекшие 34 года упорной работы в этом направлении автором было найдено большое количество новых природных математических инструментов (полинарных чисел), подобных комплексным, но отсутствующим в математике и физике [1 – 3]. Полинарные числа позволяют создавать новые оптимально простые методы расчета в любых разделах физики взамен громоздких и неуклюжих матричных и кватернионных искусственных инструментов. Стали ясно видны пути преодоления искусственно созданных барьеров в разных разделах физики. Найден ряд более точных законов в разных разделах теоретической механики и ТОЭ. В теоретической механике взамен линейных кватернионов автором найдены аналитические числа и уравнения в полинарной форме почти во всех ее разделах, а в механике сплошной среды сделано важное открытие: взамен линейной теории А.А. Ильюшина теоретически и экспериментально доказана аналитичность связи между напряжениями и деформациями в главных координатах в трехмерной гиперкомплексной форме [6]. В ТОЭ взамен четырех уравнений линейной теории поля Максвелла найдены всего два уравнения заменяющей их полностью аналитической теории электромагнитного поля. Эти два уравнения можно трактовать как два закона Кирхгофа в 4-элементной модели теории поля, но лучше их понимать как инварианты общего электромагнитного поля, как проекции магнитного и электрического полей. Заодно был устранен недостаток в уравнениях Максвелла, которым возмущался Эйнштейн – отсутствие в них механики. Максвелл ввел понятие тока смещения, т.е. добавил в двухэлементную (LR) схему замещения поля параллельно сопротивлению R емкость C. Получилась трехэлементная (LRC) схема замещения поля. Сопротивление R можно

трактовать теперь как эквивалентное сопротивление потерь или расход электроэнергии на преобразование ее в другие виды энергии через электрическое поле, как происходит, например, в СВЧ-печи. Потери в электрическом поле определяются напряжением, и поэтому сопротивление потерь включено параллельно емкости на то же напряжение.

Подобного сопротивления потерь в магнитном поле в уравнениях Максвелла нет. Напряженность магнитного поля пропорциональна току: $H = I_w / l_c$. Поэтому эквивалентное сопротивление r потерь в новой нелинейной теории поля включено последовательно с индуктивностью на тот же ток. В электродвигателях электроэнергия непрерывно превращается в механическую энергию через магнитное поле ($EI = M\omega$, а в генераторах, наоборот, механическая энергия непрерывно превращается в электроэнергию так же через магнитное поле $M\omega = EI$). Для математического описания сложного станка все скорости, моменты инерции, вращающие моменты и моменты сопротивления приводят к одному валу через коэффициенты передачи редуктора. В электроснабжении все потоки мощностей и потери приводят к одному напряжению через коэффициенты трансформации. И уравнения электромагнитного поля можно привести к одному параметру (электрическому или механическому) по законам сохранения энергии или мощности в зависимости от физического смысла задачи. Это и дает присутствие механики в новой теории поля.

Изучать новую естественную математику нашей природы (полинарное исчисление) надо с самых простых и хорошо известных физических задач. Как минимум, для этого надо отлично владеть двумерными комплексными числами в ТОЭ. Тогда будет проще понять следующий шаг – изучать трехмерные гиперкомплексные числа. Подробно трехмерное гиперкомплексное обобщение всех законов и методов расчета электрических цепей постоянного и переменного токов с примером расчета приведено в работе [3]. Для тех, кто уже освоил трехмерные гиперкомплексные числа для расчета несинусоидальных токов по основной гармонике с постоянной составляющей, предлагаем сделать следующий шаг по открывшемуся красивому и бескрайнему пути *единого математического оформления ТОЭ, теоретической механики и атомной физики* в природную (естественную) гиперкомплексную форму – опишем новый метод расчета несинусоидальных сигналов с двумя гармониками и постоянной составляющей с применением пятимерных гиперкомплексных чисел и пятимерного гиперкалькулятора с такими числами. В ТОЭ на практических занятиях по несинусоидальным токам обычно ограничиваются именно двумя гармониками и постоянной составляющей. Поэтому освоить новый перспективный современный метод расчета и пополнить свои знания в области комплексных и гиперкомплексных чисел

полезно всем электрикам и математикам, особенно преподавателям, аспирантам, докторантам и научным работникам.

Дано: линейная электрическая схема питается несинусоидальным напряжением с двумя гармониками и постоянной составляющей:

$$u(t) = E + U_1 \sin(\omega t + \varphi) + U_2 \sin(\varpi t + \psi). \quad (1)$$

Параметр ϖ будем называть «не ω », т.е. другая частота и не обязательно целнократная, как в рядах Фурье. Это принципиально важно для будущей атомной математики, с помощью которой мы собираемся широкомасштабно, мирно, целеустремленно, без атомных бомб, войн и «чернобылей» развивать атомную и термоядерную энергетику.

Главное то, что напряжение имеет пять степеней свободы и законы Кирхгофа можно наглядно изображать в виде векторных диаграмм в пятимерном пространстве, состоящем из двух комплексных плоскостей и одной вещественной оси. Все три геометрических объекта взаимно-ортогональны, так как для их физических инвариантов (гармоник) расчеты выполняют независимо друг от друга.

Для решения задачи расчета пятимерных токов и напряжения на участках схемы подойдет не какая-то единственная система счисления, а бесконечное их множество. Единственное условие: базис такой системы счисления должен представлять собой обыкновенное алгебраическое уравнение пятой степени с одним действительным корнем и двумя парами взаимно-сопряженных комплексных чисел – корней. Поэтому выберем для такой символической системы счисления самый простой базис: $j^5 = 1$. В общем случае уравнения пятой степени не разрешимы в радикалах. Но уравнения $j^n = 1$ легко решаются [7].

Из соотношения $j^5 = 1 = e^{2k\pi i}$ по формуле Эйлера находим все корни этого уравнения:

$$j_k = e^{2k\pi i/5} = \cos 2k\pi/5 + i \sin 2k\pi/5, \quad k = 0, 1, 2, 3, 4.$$

Корни алгебраического уравнения расположены симметрично на комплексной плоскости через угол $2\pi/5$ рад = $360^\circ/5 = 72^\circ$ в круге радиусом $R = 1$.

Комплексное число имеет две основные формы представления (в декартовых и полярных координатах) $\tilde{R} = X + iY = Re^{i\varphi}$, взаимосвязанных известными соотношениями:

$$X = R \cos \varphi, \quad Y = R \sin \varphi, \quad R = \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad \varphi = \arctg(Y/X). \quad (2)$$

Все полиарные числа (естественные гиперкомплексные числа) могут быть представлены в двух взаимно симметричных координатных системах (оригинал и изображение) и в каждой системе – в декартовой и показательной формах в различных координатах. Набирается много разных координатных систем и форм представления природных аналитических векторов и тензоров, но параметры всех форм и координат однозначно взаимосвязаны между собой соотношениями подобно связям (2),

что делает полинарное исчисление очень гибким, красивым и удобным математическим инструментом.

В нашей задаче все электрические величины (напряжение, токи, сопротивление и мощности) мы должны выразить в виде пятимерных чисел-векторов. Ограничимся тремя формами: оригинал только в декартовых координатах для вычислений на калькуляторе, а изображение в декартовых или гиперполярных (многомерных полярных) координатах.

Соотношения между ними приведем без вывода из [8].

Пятимерный вектор в декартовых координатах:

$$\vec{X} = X_0 + jX_1 + kX_2 + lX_3 + mX_4.$$

Его проекции (координаты пяти осей в пространстве изображений):

$$\begin{aligned} r &= X_0 + (X_1 + X_4) + (X_2 + X_3), \\ p_1 &= X_0 + v(X_1 + X_4) - \mu(X_2 + X_3), \\ p_2 &= X_0 - \mu(X_1 + X_4) + v(X_2 + X_3), \\ q_1 &= \psi(X_1 - X_4) + \omega(X_2 - X_3), \\ q_2 &= \omega(X_1 - X_4) - \psi(X_2 - X_3). \end{aligned} \quad (3)$$

Решением этой системы уравнений получаем обратные пятимерные преобразования, т.е. формулы вычисления декартовых координат оригинала:

$$\begin{aligned} X_0 &= [r + 2(p_1 + p_2)]/5, \\ X_1 &= [r + 2(vp_1 - \mu p_2 + \psi q_1 + \omega q_2)]/5, \\ X_2 &= [r + 2(-\mu p_1 + vp_2 + \omega q_1 - \psi q_2)]/5, \\ X_3 &= [r + 2(-\mu p_1 + vp_2 - \omega q_1 + \psi q_2)]/5, \\ X_4 &= [r + 2(vp_1 - \mu p_2 - \psi q_1 - \omega q_2)]/5. \end{aligned} \quad (4)$$

В формулах (3) – (4) использованы следующие константы:

$$\begin{aligned} \mu &= \cos \pi/5 = (\sqrt{5} + 1)/4 = 0.809016995, \\ v &= \cos 2\pi/5 = (\sqrt{5} - 1)/4 = 0.309016995, \\ \omega &= \sin \pi/5 = \sqrt{(5 - \sqrt{5})}/8 = 0.587785251, \\ \psi &= \sin 2\pi/5 = \sqrt{(5 + \sqrt{5})}/8 = 0.951056517. \end{aligned}$$

Сравним формулы (3) – (4) связи координат изображений вектора и оригинала с преобразованиями Лапласа. По Лапласу каждая функция имеет свое изображение. Формулы (3) справедливы для любых функций, т.е. новые преобразования из вектора-оригинала в его изображения-проекции и обратно инвариантны относительно любых аналитических преобразований для таких пятимерных гиперкомплексных чисел(векторов, переменных). Это просто взаимосвязь двух взаимно симметричных ортогональных систем координат.

Поэтому преобразования (3) – (4) справедливы для всех законов ТОЭ (Ома, Кирхгофа), для всех формул и методов расчета цепей постоянного и переменного токов, т.е. мы получили фактически пятимерное обобщение

всех законов и методов расчета цепей постоянного, переменного и периодического несинусоидального токов с двумя гармониками.

Порядок решения несинусоидальных задач пятимерным методом

Выражаем напряжения и сопротивления в комплексной форме, затем в форме 5-мерных изображений и переводим в 5-мерные оригиналы. В этой форме решаем задачу по обычным законам постоянного тока, только в 5-мерных числах. Для решения задач переменного тока достаточно калькулятора комплексных переменных с четырьмя арифметическими действиями и преобразованиями из декартовых в полярные координаты и обратно. В нашем случае точно так же. Надо иметь калькулятор с четырьмя арифметическими действиями в базисе $j^5=1$ и преобразованиями из декартовых в гиперполярные координаты и обратно по формулам (3) – (4). Такой калькулятор с преобразованиями уже создан.

Переведем заданное напряжение $u(t) = E + U_1 \sin(\omega t + \varphi) + U_2 \sin(\omega t + \psi)$ в комплексную форму для каждой гармоники отдельно, как обычно делают в ТОЭ:

$$U_0 = E, \quad \tilde{U}_1 = U_1 e^{i\varphi} = p_1 + iq_1, \quad \tilde{U}_2 = U_2 e^{i\psi} = p_2 + iq_2$$

и сразу же записываем в гиперполярных координатах: $\tilde{U} = E^J U_1^{K_1} e^{I_1 \varphi} U_2^{K_2} e^{I_2 \psi}$

и в декартовых координатах изображений: $\tilde{U} = JE + K_1 p_1 + I_1 q_1 + K_2 p_2 + I_2 q_2$, где неединичные направляющие векторы J, K_1, K_2, I_1, I_2 пространства изображений связаны однозначными соотношениями с единичными направляющими векторами $1, j, k = j^2, l = j^3, m = j^4$ пространства оригиналов.

Активные и реактивные составляющие гармоник определяем по обычным формулам:

$$p_1 = U_1 \cos \varphi_1, \quad q_1 = U_1 \sin \varphi_1, \quad p_2 = U_2 \cos \varphi_2, \quad q_2 = U_2 \sin \varphi_2.$$

Переводим вектор напряжения в декартовы координаты оригинала, для чего находим координаты 5-мерного вектора напряжения по формулам (4) оригинала:

$$u_0 = [E + 2(p_1 + p_2)]/5,$$

$$u_1 = [E + 2(\nu p_1 - \mu p_2 + \psi q_1 + \omega q_2)]/5,$$

$$u_2 = [E + 2(-\mu p_1 + \nu p_2 + \omega q_1 - \psi q_2)]/5,$$

$$u_3 = [E + 2(-\mu p_1 + \nu p_2 - \omega q_1 + \psi q_2)]/5,$$

$$u_4 = [E + 2(\nu p_1 - \mu p_2 - \psi q_1 - \omega q_2)]/5.$$

Перевод сопротивления в гиперкомплексную 5-мерную форму.

Для заданной схемы и заданных частот гармоник по обычным правилам и формулам в несинусоидальных цепях вычисляем сопротивление постоянному току R и комплексное сопротивление на частотах гармоник: $Z_1 = r_1 + ix_1$ и $Z_2 = r_2 + ix_2$. Затем по формулам (4) вычисляем координаты пятимерного гиперкомплексного сопротивления оригинала:

$$z_0 = [R + 2(r_1 + r_2)]/5,$$

$$\begin{aligned} z_1 &= [R + 2(vr_1 - \mu r_2 + \psi x_1 + \omega x_2)]/5, \\ z_2 &= [R + 2(-\mu r_1 + vr_2 + \omega x_1 - \psi x_2)]/5, \\ z_3 &= [R + 2(-\mu r_1 + vr_2 - \omega x_1 + \psi x_2)]/5, \\ z_4 &= [R + 2(vr_1 - \mu r_2 - \psi x_1 - \omega x_2)]/5. \end{aligned}$$

Дальше по законам Ома и Кирхгофа, по известным методам расчета и формулам цепи постоянного тока (метод контурных токов, метод узловых напряжений, ...) выполняем расчет токов в ветвях и напряжения в узлах, но только все величины в 5-мерной декартовой форме. Например, ток в цепи вычисляем по закону Ома делением двух чисел на 5-мерном калькуляторе: $\vec{I} = \vec{U} / \vec{Z} = (u_0 + ju_1 + ku_2 + lu_3 + mu_4) / (z_0 + jz_1 + kz_2 + lz_3 + mz_4) = I_0 + jI_1 + kI_2 + lI_3 + mI_4$.

На калькуляторе все пять чисел аргумента и функции расположены в одну строчку подряд. Их не обязательно набирать вручную, а достаточно выделить мышкой, копировать, вставить в нужное место и нажать ОК. Так проще и значительно точнее, так как на ЭВМ расчеты в десятичной форме выполняются с мантиссой в 15 разрядов, а вручную мы ограничиваем точность до 3 – 5 разрядов с большим накоплением ошибок в расчетах из-за грубого округления чисел. Все новое сильно отпугивает человека непривычностью и сложностью. Новые формулы кажутся громоздкими и сложными. Нет желания заставить себя разбираться с ними или поверить в их правильность. Это работает закон инерции мышления человека. Все новые формулы защиты в программе калькулятора и все вычисления выполняются мгновенно и полностью автоматически. Если в общем алгоритме учтены и сшиты все вычислительные блоки метода решения и формулы расчета схемы, то вручную достаточно ввести всего несколько чисел – исходное напряжения, частоты, фазовые углы гармоник, параметры схемы и нажать кнопку «Ок».

Баланс мощностей выполняем, как обычно, отдельно для активной и реактивной мощностей, суммируя их по всем гармоникам. Мощность источника в 5-мерной форме, как и в комплексной форме, равна произведению вектора напряжения на сопряженный ток:

$$\vec{S} = \vec{U} \vec{I}^* = E^J U_1^{K_1} e^{I_1 \varphi_u} U_2^{K_2} e^{I_2 \varphi_u} I_0^J I_a^{K_1} e^{-I_1 \varphi_i} I_b^{K_2} e^{-I_2 \varphi_i} = JP_{\pm} + K_1 P_{\sim 1} + K_2 P_{\sim 2} + I_1 Q_1 + I_2 Q_2,$$

где $P_{\pm} = EI_0$, $P_{\sim 1}$, $P_{\sim 2}$, Q_1 , Q_2 – мощности постоянной составляющей и гармоник.

Числовой пример расчета с балансом мощностей для 3-мерного случая приведен в [3].

Рекомендуем сначала хорошо освоить его и решить задачи разными методами для того, чтобы лично убедиться, что все законы и методы расчета цепей постоянного тока абсолютно точно работают и в трехмерном гиперкомплексном обобщении для несинусоидальных токов с присутствием в ветвях схемы источников постоянного и переменного токов.

Для двух гармоник с 5-мерными числами все так же. В задачах расчета мощных силовых электрических машин из-за нелинейности магнитопровода желательно учесть около полсотни гармоник, влияющих на мощность, потери, КПД. Этого не делают из-за сложности такой задачи. Подробнее ознакомиться с полинарным исчислением, многомерными гиперкомплексными числами и векторными калькуляторами можно на сайте: vectorcalc.ucoz.ru.

Библиографический список

1. Филинов, В.А. Физические основы аналитического моделирования многомерных объектов / В.А. Филинов. Тверь: ТГТУ, 1995.
2. Филинов, В.А. Оптимальные гиперкомплексные числа в физике / В.А. Филинов // сайт: hypercomplex.xpsweb.com/ Number, Time, Relativity, Bauman MSTU 2004, p. 42-44.
3. Филинов, В.А. Математическая методология научного познания фундаментальных законов многосвязной физики (путь к атомной математике и нанознергетике): учеб. пособие. Тверь: Тверская областная типография, 2008. 304 с.
4. Филинов, В.А. Методология решения неразрешимых задач / В.А. Филинов // Вестник ТГТУ. 2007. Вып. 12. С. 27-32.
5. Кантор, И.Л. Гиперкомплексные числа / И.Л. Кантор, А.С. Солодовников. М.: Наука, 1973.
6. Свидетельство о регистрации результата интеллектуальной деятельности: «Теоретические основы и экспериментальные доказательства взаимосвязи напряжений и деформаций в гиперкомплексной форме». М: Российское авторское общество, № 15697, 23.09.09. 6 с.
7. Анго, Андре. Математика для электро- и радиоинженеров / Андре Анго. М: Наука, 1965. 780с.
8. Филинов, В.А. Теория функций полинарного аргумента / В.А. Филинов. Калинин: КПИ, 1983. 74 с. Деп. в ВИНТИ 18.01.83, № 572-83Б.

Содержание

Введение	3
Макаров А.Н., Соколов А.Ю. Обобщенное аналитическое выражение для расчета угловых коэффициентов излучения факела на поверхности нагрева в нагревательных печах.....	5
Макаров А.Н., Дюндин А.С. Теплообмен в камере сгорания газотурбинных двигателей.....	13
Макаров А.Н., Соколов А.Ю., Зуйков Р.М. Повышение эффективности теплообмена в дуговых сталеплавильных печах переменного тока.....	19
Рыжков О.И., Усова Г.И., Силин В.Е., Рыжков А.Ф. Процессы горения гранулированного топлива.....	22
Махаев А.Д., Баталов Н.Н., Рыжков А.Ф. Определение теплопроводности материалов карбонатного топливного элемента методом цилиндрического слоя в стационарном тепловом режиме.....	26
Макаров А.Н., Луговой Ю.А., Шевченко М.Н. Рациональное положение плазмотронов в плазменно-дуговых сталеплавильных печах с четырьмя плазмотронами.....	31
Кувалдин А.Б., Пунанов Р.В., Курнешов А.А. Выбор системы электронагрева для газостата высокого давления.....	33
Алексеев В.С., Лавкин А.Г. Распределение температурных полей от модулей Пельтье в камере влагоудаления.....	37
Кондрашов В.П., Колыванов С.Ю., Сапрыкин А.И., Лыков А.Г., Савалык Н.А., Погребисский М.Я. Исследование технико-экономических показателей рудно-термических печей.....	40
Елизаров К.А. Создание электрогидравлического регулятора мощности дуговой печи с улучшенными показателями.....	44
Алексеев В.С., Антонов И.Н. Энергосберегающая система автоматизации для конденсационной сушки семян растений и лекарственных трав.....	48
Соколов А.Ю. Особенности теплообмена в дуговых сталеплавильных печах переменного тока.....	49
Енин А.С., Лобзина М.А, Апийо Вини Адхиамбо. Уменьшение потерь мощности в цеховых силовых трансформаторах.....	53
Устьянов С.С. Борьба с хищениями электроэнергии и неплательщиками.....	56
Узикова Т.И., Корнеев К.Б., Коробёнков П. Тепловизионная диагностика состояния электроконтактных соединений.....	59
Мотылёв О.Ф. Анализ потерь в системе электроснабжения города после перестройки.....	63

Бугров В.Г., Левыкин Д.А., Алисова О.А., Цыганов И.М. Автоматизированное прогнозирование эксплуатационной надежности районных систем электроснабжения.....	67
Русин А.Ю., Абдулхамед Мохамед. Обработка результатов ускоренных испытаний электрооборудования на надежность.....	72
Киселев А.Н., Громилин В.А. Состояние учета электроэнергии в Тверьэнерго: проблемы и перспективы.....	78
Маринова С.В., Киселев А.Н. Выбор тарифа при расчете промышленных предприятий за электроэнергию.....	84
Филинов В.А. Причины неразрешимости уравнения Шредингера	88
Филинов В.А., Карпучек А.М. Гиперкомплексное обобщение всех законов и методов расчета цепей постоянного, переменного и несинусоидального токов.....	94

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Материалы Российской научно-технической конференции
г. Тверь, 22 – 23 апреля 2010 г.

Составители и научные редакторы А.Н. Макаров, К.Б. Корнеев

Редактор В.А. Крылова

Корректор И.И. Рогова

Технический редактор Т.С. Самборская

Подписано в печать 03.06.10

Формат 60x84/16

Бумага писчая

Физ. печ. л. 6,5

Усл. печ. л. 6,04

Уч.-изд. л. 5,65

Тираж 100 экз.

Заказ № 40

С – 36

Редакционно-издательский центр

Тверского государственного технического университета

170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22