

ВЕСТНИК

ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО № 20 (92)
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА 2007

ISSN 1990-8512

СЕРИЯ

«ЭНЕРГЕТИКА»

Выпуск 8

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Редакционная коллегия:

д.т.н., профессор, член-корреспондент АЭН РФ **Ю.И. Хохлов** (*отв. редактор*);
к.т.н., доцент **Б.Г. Булатов** (*зам. отв. редактора*);
к.т.н., доцент **Л.Т. Волков**; **Д.В. Коробатов** (*отв. секретарь*);
д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ **Е.В. Торопов**;
д.т.н., профессор **Л.И. Цытович**; д.т.н., профессор **Ш.Н. Хусанов**

СОДЕРЖАНИЕ

Теплоэнергетика

ПАНФЁРОВ В.И., АНИСИМОВА Е.Ю., НАГОРНАЯ А.Н. Об оптимальном управлении тепловым режимом зданий	3
ТОРОПОВ Е.В., ОСИНЦЕВ К.В. Особенности и экологическое совершенствование факельных технологий сжигания газа на котлах тепловых электростанций	10
ВАХИТОВ Р.Ш. Решение задачи расчета реактивности ядерного реактора с учетом ее некорректности	12
ГОРБЕНКО В.И. Численное моделирование температурных полей тел сложной формы на принципе диакоптики	15

Электромеханика

ГАНДЖА С.А. Особенности построения системы автоматизированного проектирования вентиляльных машин с аксиальным зазором	19
---	----

Содержание

УСЫНИН Ю.С., ВАЛОВ А.В. Импульсное управление асинхронным двигателем с фазным ротором	24
ЛОХОВ С.П., СИВКОВА А.П. Распределённая модель гистерезиса с вихревыми токами	27

Электроэнергетика

ХУСАИНОВ Ш.Н., НАРАЕВА Р.Р. Анализ методов определения проводимости изоляции для линии с отпайкой	32
ПРЕОБРАЖЕНСКИЙ К.А. Применение теории планирования эксперимента к анализу электромагнитных процессов в СЭС	38
БЕЛЯЕВА Л.А., БУЛАТОВ Б.Г. Оценка потерь электроэнергии на корону по данным телеметрии	43
БАРАНОВ Л.А. , БУРНАЕВ М.Г. Устройство для электротермической обработки почвы защищенного грунта	46
ГРАММ М.И. Связь входных параметров цепей со спектром матриц однородного базиса	50

Научно-методические вопросы

ЮСУПОВ Р.Х., ГОРШКОВ Ю.Г., ЗАЙНИШЕВ А.В. Прогнозирование состояния производственного травматизма и производственно-обусловленной заболеваемости рабочих коллективов на основе теории информационных цепей	54
---	----

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 669.074

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ЗДАНИЙ

В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова, А.Н. Нагорная
г. Челябинск, ЮУрГУ

Рассмотрена задача оптимального управления тепловым режимом здания в нерабочее время. Найден алгоритм оптимального управления режимом прерывистого отопления. Разработан метод построения конкретных графиков подачи теплоты для выбранных зданий, оценена экономическая эффективность оптимального управления в условиях как централизованного, так и автономного теплоснабжения.

Известно, что в нежилых помещениях в нерабочее время температуру воздуха можно поддерживать на более низком уровне, чем в остальные промежутки времени. Это дает возможность сэкономить расход теплоты на отопление. Однако для получения максимального эффекта от реализации такого, так называемого режима прерывистого отопления необходимо решить задачу об оптимальном управлении этим режимом. Рассмотрим постановку этой задачи.

Как нами установлено [1, 2, 3], температурный режим помещения удовлетворительно может быть описан следующим дифференциальным уравнением

$$T \frac{d\theta(\tau)}{d\tau} + \theta(\tau) = kW_0(\tau), \quad (1)$$

где $\theta(\tau)$ – избыточная температура, $\theta(\tau) = t_B(\tau) - t_H(\tau)$, $t_B(\tau)$, $t_H(\tau)$ – соответственно температура внутреннего и наружного воздуха, T – постоянная времени, $W_0(\tau)$ – мощность системы отопления, τ – время, k – коэффициент передачи.

Количество теплоты, израсходованной системой отопления, оценивается функционалом

$$I = \int_0^{\tau_H} W_0(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где τ_H – заданное время.

Задача оптимального управления тепловым режимом формулируется следующим образом [4]: требуется найти такое управление мощностью системы отопления $W_0(\tau)$, которое переводило бы объект $\theta(\tau) = \theta_K$ управления (1) из заданного начального состояния $\theta(0) = \theta_0$ в заданное конечное состояние $\theta(\tau_H) = \theta_K$ за заданное время τ_H , при этом расход теплоты I системой отопления был бы минимальным. Формально это записывается так:

$$I \rightarrow \min_{W_0}$$

Мощность системы отопления должна при этом удовлетворять следующему ограничению:

$$W_0^{\min} \leq W_0(\tau) \leq W_0^{\max}, \quad (3)$$

где W_0^{\max} – установленная мощность системы отопления, W_0^{\min} – минимальная мощность системы отопления, как рекомендуется работой [5], эта мощность должна обеспечить поддержание температуры внутреннего воздуха на уровне 12°C , исключающем выпадение конденсата на поверхностях ограждений.

В работе [6] формулировалась аналогичная задача оптимального управления, однако при решении этой задачи предполагалось, что температура внутренних поверхностей ограждений «... задана и сохраняет постоянное значение в период натопа». Заметим, что данное допущение, как это нетрудно видеть, означает, что ограждающие конструкции здания, отличающиеся наибольшей теплоемкостью из всех участников теплообмена, никак не влияют на решение поставленной задачи, т.е. на выбор оптимального управления. Далее в работе утверждается, что исходная условная задача сводится к некоей безусловной задаче, экстремалами которой являются прямые линии, т.е. в оптимальном процессе $t_B(\tau)$ должна быть линейной функцией времени. Затем авторы, полагая дополнительно, что во время натопа и температура наружного воздуха является константой, из модели процесса находят, что оптимальное управление – мощность системы отопления тоже должно быть константой. После этого в работе [6] делается совсем нелогичный вывод, что «... оптимальность управления означает минимальность времени» натопа помещения и авторы переходят к рассмотрению задачи о максимальном быстродействии. Конечно, можно продолжить рассмотрение всех особенностей указанной работы, однако в этом нет

большого смысла: уже отмеченные замечания делают сомнительным обоснованность выводов, поэтому достаточно смело можно утверждать, сформулированная выше задача оптимального управления еще не решена

Кстати говоря, из выводов работы [6] следует, что оптимальное управление имеет только один интервал постоянства, кроме того, авторы, по-видимому, не различают понятия времени натопа и времени максимального быстрогодействия. Время натопа (разогрева помещения) может значительно превышать время максимального быстрогодействия, время максимального быстрогодействия – это минимально возможное время, за которое можно «нагреть» помещение до заданной температуры.

В работе [7] оценивается эффективность режима максимального быстрогодействия, причем одним из декларируемых авторами тезисов является утверждение о том, что «разогрев ... необходимо начинать с разогрева наиболее теплее частей помещения». Вместе с тем, как уже это отмечалось, при отыскании оптимального управления авторы в [6] полагали, что температура внутренних поверхностей ограждений «... задана и сохраняет постоянное значение в период натопа». Таким образом, наблюдается явное противоречие между допущениями, принятыми при решении задачи, и тем, что рекомендуется при практическом использовании, якобы, этого решения. В целом, создается впечатление, что авторы, поставив, но, в общем-то, так и не решив задачу (как следует из материалов работы [7], это они поняли и сами), либо позаимствовали то, что давно было известно, например, в металлургической теплотехнике из результатов задач оптимального управления нагревом металла, эти результаты были обобщены, в частности, в работах [8, 9], либо высказали свои интуитивные соображения.

Однако вернемся к рассмотрению поставленной задачи и подчеркнем, что для режима прерывистого отопления данная задача имеет следующую особенность: в начале и в конце рассматриваемого промежутка времени $[0, \tau_H]$ избыточная температура $\theta(\tau)$ должна быть равна одному и тому же значению θ_0 , такова особенность режима прерывистого отопления.

Для решения поставленной задачи нами была использована теорема об n интервалах в формулировке работы [10], согласно этой теореме оптимальное управление в данной задаче будет представляться кусочно-постоянной функцией, принимающей граничные значения и имеющей не более двух интервалов постоянства.

Для простоты будем считать, что τ_H таково, что в графике $W_0(\tau)$ есть два интервала постоянства и что длительность этих интервалов одинакова. Мощность системы отопления для первого интервала обозначим через W_{01} , а для второго интер-

вала – через W_{02} . Так как за время режима прерывистого отопления избыточная температура $\theta(\tau)$ должна измениться от значения θ_0 до значения θ_0 то на основании (1) получается следующее уравнение, связывающее W_{01} и W_{02} :

$$kW_{02} + kW_{01} \cdot (1 - a) = \theta_0(2 - a), \quad (4)$$

где $a = 1 - \exp(-\tau_H / (2T))$.

Функционал I преобразуется в обычную функцию двух переменных W_{01} и W_{02} и будет иметь вид:

$$I = W_{01} \frac{\tau_H}{2} + W_{02} \frac{\tau_H}{2}. \quad (5)$$

Здесь общий множитель $\tau_H / 2$ можно просто опустить, так как он не влияет на результаты решения задачи, т.е. на ответ.

Таким образом, поставленная задача оптимального управления свелась к условной задаче нелинейного программирования: требуется найти минимум функции I , заданной уравнением (5), при условии, что ее аргументы W_{01} и W_{02} должны удовлетворять соотношениям (3) и (4):

$$I \rightarrow \min_{W_{01}, W_{02} \in G}, \quad (6)$$

$$\text{где } G: \begin{cases} W_0^{\min} \leq W_{01}, W_{02} \leq W_0^Y; \\ kW_{02} + kW_{01}(1 - a) = \theta_0(2 - a). \end{cases}$$

Заметим, что исходную задачу неклассического вариационного исчисления можно свести к точно такой же задаче нелинейного программирования и другим способом, а именно методом параметризации функции управления, конкретно представляя ее состоящей из двух дискрет одинаковой длительности [11]. Для решения сведем условную задачу оптимизации (6) к безусловной методом подстановки, для этого из уравнения (4) выразим, например, W_{02} через W_{01} и подставим в критерий (5), тогда будем иметь, что

$$I = \theta_0 \frac{(2 - a)}{k} + aW_{01} \quad (7)$$

Учитывая, что коэффициент a в реальных условиях удовлетворяет неравенству $1 > a > 0$, из (7) найдем, что чем меньше мощность системы отопления на первом интервале постоянства, тем экономичнее режим, следовательно, на первом интервале мощность системы отопления должна быть равна W_0^{\min} . Примечательно, что если из (4) выразим W_{01} через W_{02} и подставим в критерий оптимальности, тогда задача оптимизации будет иметь вид:

$$I = \theta_0 \frac{2 - a}{k(1 - a)} - W_{02} \frac{a}{(1 - a)} \rightarrow \min_{W_{02}}. \quad (8)$$

Из последнего соотношения следует: чем больше величина W_{02} , тем меньше величина I , следовательно, на втором интервале мощность системы отопления должна быть равна W_0^y [12].

Таким образом, сначала для простоты решения задачи мы полагали, что длительность интервалов постоянства управления одинакова, однако на самом деле это далеко не всегда так, длительность интервалов постоянства в общем случае должна быть различной. Теперь выясним, какой должна быть длительность каждого интервала, с тем чтобы в начале и в конце процесса температура была бы равна θ_0 . Решение задачи оптимального управления в такой постановке, вероятнее всего, даст больший эффект. Обозначим длительность первого интервала через τ_1 , а второго – через τ_2 . Очевидно, что величины связаны следующими соотношениями

$$\begin{cases} kW_{02} \left(1 - e^{-\frac{\tau_2}{T}} \right) + kW_{01} \left(e^{-\frac{\tau_2}{T}} - 1 + a \right) = a\theta_0; \\ \tau_1 + \tau_2 = \tau_n, \end{cases} \quad (9)$$

где $W_{01} = W_0^{\min}$ – минимальная мощность системы отопления, $W_{02} = W_0^{\max}$ – максимальная, установленная тепловая мощность, $a = 1 - \exp\left(-\frac{\tau_k}{T}\right)$.

Найдем из первого уравнения системы (9) выражение для определения τ_2 :

$$\tau_2 = -T \cdot \ln \left(1 + \frac{\frac{a\theta_0}{k} - aW_{01}}{W_{01} - W_{02}} \right). \quad (10)$$

Из второго уравнения системы (9) найдем, что продолжительность первого интервала времени будет определяться следующим образом:

$$\tau_1 = \tau_k + T \cdot \ln \left(1 + \frac{\frac{a\theta_0}{k} - aW_{01}}{W_{01} - W_{02}} \right). \quad (11)$$

Функционал I в этом случае будет иметь вид

$$\begin{aligned} I = W_{01} & \left(\tau_k + T \ln \left(1 + \frac{\frac{a\theta_0}{k} - aW_{01}}{W_{01} - W_{02}} \right) \right) + \\ & + W_2 \left(-T \ln \left(1 + \frac{\frac{a\theta_0}{k} - aW_{01}}{W_{01} - W_{02}} \right) \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Понятно, что весьма интересен вопрос о том, будет ли справедливым в данном случае установленный при предыдущем допущении результат: чем меньше W_{01} и чем больше W_{02} , тем лучше, тем экономичнее режим натопа. Ответить на этот вопрос можно, если, во-первых, выяснить, имеют ли поверхности (W_{01}, W_{02}, I) достаточно типичный вид и, во-вторых, вид этих поверхностей такой, что позволяет ответить на поставленный вопрос.

С этой целью, используя выражение (12), построили зависимость критерия I от мощности системы отопления на первом и втором промежутках времени. Эта поверхность приведена на рис. 1.

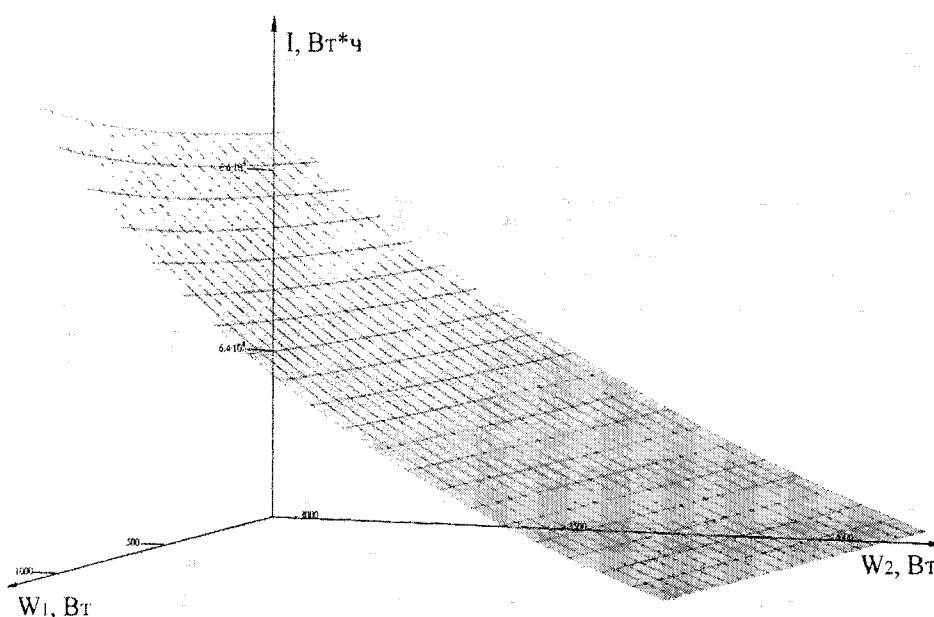


Рис. 1. Изменение критерия I при различных значениях тепловых мощностей системы отопления на первом и втором временных промежутках (в режиме прерывистого отопления)

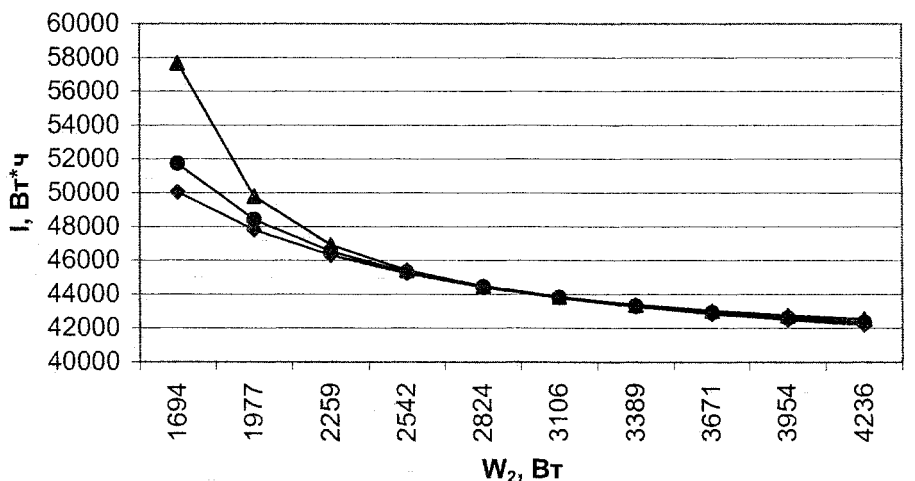
Теплоэнергетика

На рис. 2, 3 приведены сечения этой поверхности плоскостями $W_{01} = \text{const}$, и $W_{02} = \text{const}$. Поверхность строилась для области, Вт

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq W_{01} \leq 1200 \\ 3000 \leq W_{02} \leq 4236 \end{array} \right.$$

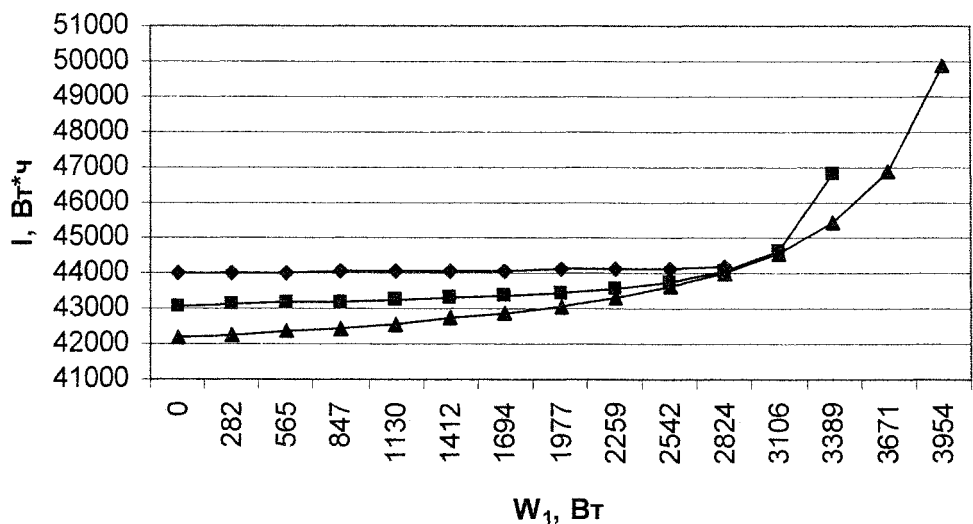
Это обуславливается теплотехническими характеристиками следующего здания. Здание удовлетворяет требованиям второго этапа энергосбережения для города Челябинска. Мощность системы отопления 4236 Вт. Площадь стен дома

$F_{cm} = 79,27 \text{ м}^2$; площадь перекрытия $F_n = 69,12 \text{ м}^2$. Коэффициент теплопередачи окон $K_{ок} = 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$, общая площадь окон $F_{ок} = 11,55 \text{ м}^2$. Наружные двери площадью $F_{дв} = 2,6 \text{ м}^2$; коэффициент теплопередачи дверей $K_{дв} = 1,05 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$. Температура наружного воздуха $t_H = -34^\circ\text{C}$; начальная температура воздуха в помещениях здания равна 21°C .



—◆— $I=f(W_2)$, $W_1=0$ Вт —●— $I=f(W_2)$ при $W_1=500$ Вт —▲— $I=f(W_2)$, $W_1=1000$ Вт

Рис. 2. Зависимость критерия I от различных значений максимальной мощности W_{02} , и постоянной минимальной мощности $W_{01} = 0$ Вт (500 Вт, 1000 Вт)



—◆— $I=f(W_1)$, $W_2=3000$ Вт —■— $I=f(W_1)$, $W_2=3500$ Вт —▲— $I=f(W_1)$, $W_2=4236$ Вт

Рис. 3. Зависимость критерия I от различных значений минимальной мощности W_{01} и постоянной максимальной мощности $W_{02} = 3000$ Вт (3500 Вт, 4236 Вт)

Стены здания выполнены из ячеистых блоков $\delta = 0,75$ м, $c = 0,84$ кДж/(кг $^{\circ}$ С); $\rho = 1000$ кг/м 3 ; $\lambda = 0,31$ Вт/(м $^{\circ}$ С). Постоянная времени $T = 54$ ч. Из рис. 1 видно, что функционал, I , оценивающий количество теплоты, израсходованной системой отопления, имеет наименьшие значения в области, когда тепловая мощность на первом промежутке времени минимальна, а на втором – максимальна. Такой же результат подтверждается сечениями поверхности критерия I . На рис. 2 приведены три сечения критерия I при $W_{01} = 0$ Вт. На рис. 3 приведено три сечения функционала I при $W_{02} = 3000$ Вт, $W_{02} = 3500$ Вт, $W_{02} = 4236$ Вт.

По вышеизложенному методу был спроектирован оптимальный режим прерывистого отопления для ранее рассмотренного здания [13, 14].

На рис. 4 и 5 приведены зависимости продолжительности времени отключения и включения системы отопления и температуры внутреннего воздуха для различных параметров наружного воздуха; продолжительность нерабочего времени составляет 15 часов – с 18 00 до 9 00 , что характерно для общественных зданий.

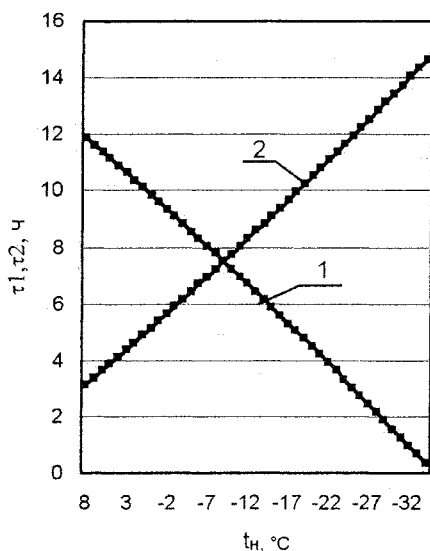


Рис. 4. Продолжительность времени отключения (кривая 1) и включения (кривая 2) системы отопления 4

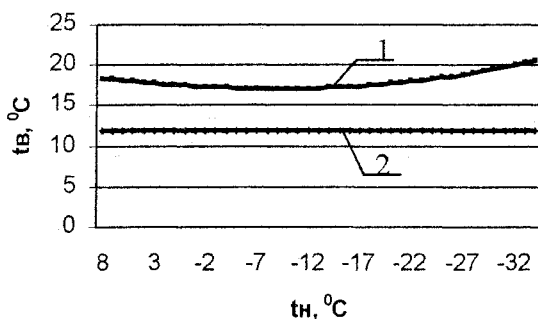


Рис. 5. Значения фактической (кривая 1) и допустимой (кривая 2) температур внутреннего воздуха

В течение периода времени τ_1 мощность системы отопления снижается в данном случае до $W_{01} = 0$ Вт, а затем в течение периода τ_2 происходит разогрев (натоп) здания с максимальной мощностью системы отопления равной расчетной. Как видно из рис. 5, температура внутреннего воздуха не опускается ниже 12 $^{\circ}\text{C}$, что согласуется с нормами [15].

Рис. 6 и 7 иллюстрируют случай, когда заданное здание подключено к тепловым сетям и производится качественное центральное регулирование отпуска тепла на источнике, т.е. мощность, необходимая для разогрева здания, является функцией температуры наружного воздуха.

Из рис. 6 и 7 видно, что при качественном регулировании, рассчитанном конкретно для данного здания, применять прерывистое отопление нецелесообразно. Это объясняется тем, что для натопа, следующего за периодом отключения, нет резерва тепловой мощности, теплота, поставляемая тепловыми сетями практически полностью расходуется на компенсацию теплопотерь. Применение режима прерывистого отопления при централизованном теплоснабжении возможно в следующих случаях:

1) если здание более «теплое», т.е. имеет повышенные коэффициенты сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, по сравнению с типовыми зданиями. В этом случае появляется некоторый резерв тепловой мощности, необходимый для осуществления натопа здания;

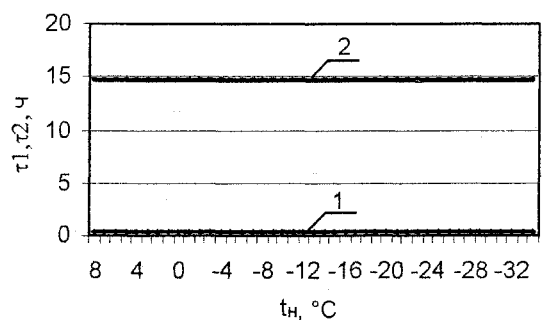


Рис. 6. Продолжительность времени отключения (кривая 1) и включения (кривая 2) системы отопления

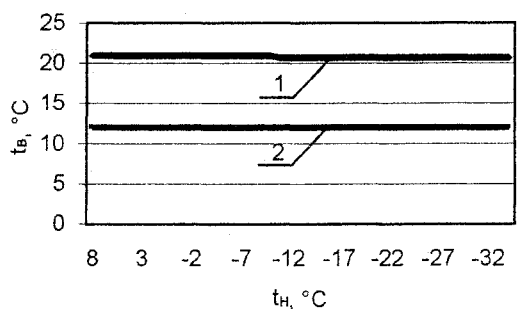


Рис. 7. Значения фактической (кривая 1) и допустимой (кривая 2) температур внутреннего воздуха

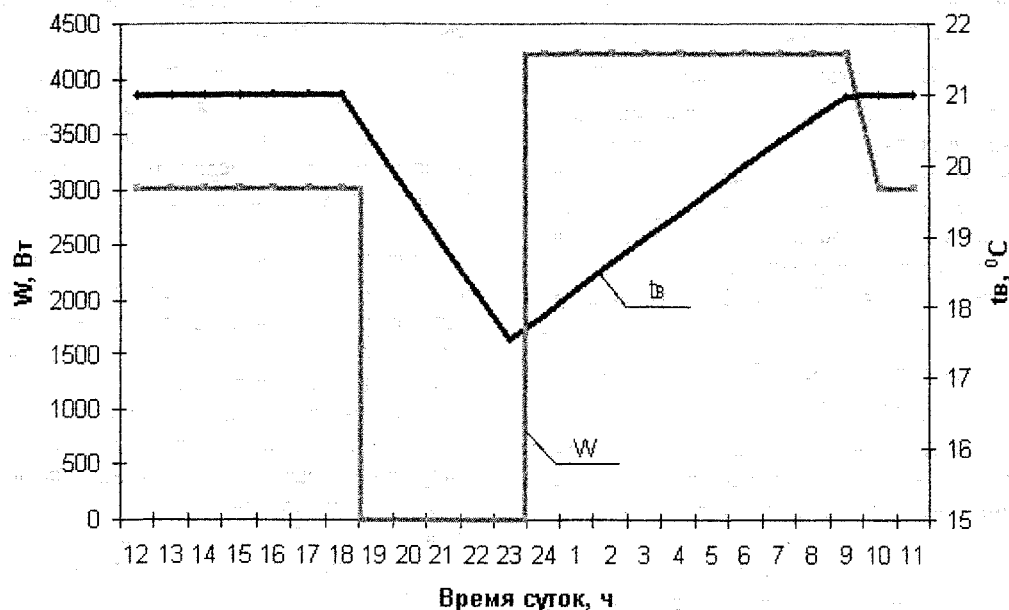


Рис. 8. Изменение мощности системы отопления и температуры внутреннего воздуха при оптимальном управлении

2) если есть возможность отказаться от смешения теплоносителей в период разогрева здания. Это не противоречит санитарно-гигиеническим требованиям, предъявляемым к температуре поверхности отопительных приборов, так как натоп здания происходит в нерабочее время.

Выяснили, какой режим является более экономичным: режим прерывистого отопления или режим централизованного теплоснабжения при качественном регулировании на источнике [13, 14]. Для этого нашли количество теплоты, израсходованное системой отопления за нерабочий период времени из уравнения (2).

Расчеты проводились для указанного здания при температуре наружного воздуха минус 18°C.

Для режима прерывистого отопления из рис. 4 видно, что продолжительность отключения системы отопления составляет 5,04 часа, тогда, как это следует из того же рисунка, продолжительность натопа здания при мощности $W_0^{\max} = 4236$ Вт равна 9,96 часа. График оптимального управления отоплением приведен на рис. 8. Расход теплоты за нерабочее время при оптимальном прерывистом режиме отопления определяется по формуле (2) и составляет:

$$I = 0,5,04 + 4236 \cdot 9,96 = 42190,56 \text{ Вт}\cdot\text{ч.}$$

Если бы здание отапливалось по обычному качественному графику при тепловой мощности $W_0 = 3004$ Вт, то расход теплоты был бы равен:

$$I = 3004 \cdot 15 = 45060 \text{ Вт}\cdot\text{ч.}$$

Следовательно, в режиме прерывистого отопления достигается экономия теплоты 2870 Вт·ч, что составляет 6,4 %.

Литература

1. Панферов, В.И. Моделирование и управление тепловым режимом зданий / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашина // *Материалы Международ. научно-практ. конф. «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции»* сборник. – М.: МГСУ, 2005. – С. 94–98.
2. Панферов, В.И. Идентификация и управление тепловым режимом зданий / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашина // *Вестник ГОУ ВПО УГПУ–УПИ «Строительство и образование», № 14(66)*. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ. – 2005. – С. 351–353.
3. Панферов, В.И. Математическая модель теплового режима зданий: Энергетики и металлурги настоящему и будущему России / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашина // *Тез. докл. 5-й Всероссийской научно-техн. конф.* – Магнитогорск: МГТУ, 2004.
4. Панферов, В.И. Минимизация затрат энергии в процессе разогрева помещения при прерывистом отоплении / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашина // *Материалы Юбилейной XIV Международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству»*. Сборник трудов. – Челябинск: ЧГАУ, 2006. – Ч.4.
5. Сканава, А.Н. Отопление / А.Н. Сканава, Л.М. Махов. – М.: Издательство АСВ, 2002. – 546 с.
6. Табунчиков, Ю.А. Минимизация расхода энергии, затрачиваемой на натоп помещения / Ю.А. Табунчиков, М.М. Бродач // *Издательство вузов. Строительство и архитектура.*–1988.– № 12.– С. 84–87
7. Табунчиков, Ю.А. Экспериментальное исследование оптимального управления расходом

энергии / Ю.А. Табунчиков, М.М. Бродач // АВОК. – 2006. – № 1. – С. 32–36.

8. Панферов, В.И. Анализ экономических способов нагрева металла в методических печах / В.И. Панферов, Б.Н. Парсункин, Е.В. Торопов // Автоматическое управление металлургическими процессами: Межвузовский сб. научн. трудов. – Магнитогорск: МГМА им. Г.И. Носова, 1996. – С. 63–72.

9. Панферов, В.И. О принципе экономичного управления нагревом металла и его реализации в методических печах // Труды III Международной науч.-практ. конф.: «Металлургическая теплотехника: история, современное состояние, будущее. К столетию со дня рождения М.А. Глинкова. – М.: МИСиС, 2006. – С. 467–470.

10. Теория автоматического управления: Нелинейные системы управления при случайных воздействиях: Учебник для вузов/ А.В. Нетушил, А.В. Балтрушевич, В.В. Бурляев и др.; под ред. А.В. Нетушила. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1983. – 432 с.

11. Современные принципы управления сложными объектами/ Л.А. Растрюгин. – М.: Сов. Радио, 1980. – 232 с.

12. Панферов, В.И. Оптимизация режима прерывистого отопления / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашина // Проблемы теплоэнергетики. Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2006. – 52 с.

13. Панферов, В.И. Экономия тепловой энергии при различных режимах прерывания отопления/ В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашина // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: тез. Докл. 7-й Всероссийской научно-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Магнитогорск: МГТУ, 2006. – 188 с.

14. Панферов, В.И. Оптимальный режим прерывистого отопления/ В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Е.Ю. Пашина // Материалы Пятой Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности». – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – Том 1 – 236 с.

15. СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование», Госстрой России, 2004.

Панферов Владимир Иванович – д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Теплогасоснабжение и вентиляция» ЮУрГУ.

Область научных интересов: моделирование и оптимизация теплотехнических процессов и систем, автоматизация технологических объектов.

Анисимова Елена Юрьевна – аспирант и ассистент кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция», ЮУрГУ

Область научных интересов: моделирование и оптимизация тепловых режимов.

Нагорная Анастасия Николаевна – аспирант и ассистент кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция», ЮУрГУ.

Область научных интересов: моделирование и оптимизация тепловых режимов.

ОСОБЕННОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФАКЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СЖИГАНИЯ ГАЗА НА КОТЛАХ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Е.В. Торопов, К.В. Осинцев
г. Челябинск, ЮУрГУ

Рассмотрено техническое состояние горелочного парка ТЭС в начальный период освоения газофакельных технологий. Показаны методы и пути их совершенствования. Отражён вклад специалистов кафедры ПТЭ ЮУрГУ в развитие и освоение новых технологий.

Несомненные экономические и экологические преимущества от использования на ТЭС природного газа в сравнении с твёрдым и жидким топливами являются сегодня мощными стимулами развития котельной техники с газофакельными технологиями.

Исторически сложилось убеждение, что хорошо организованное факельное горение связано с наиболее полным выгоранием газа, достичь которого можно лишь при активном перемешивании газовых струй с воздушными потоками непосредственно в полости горелок. Как правило, это приводило к раннему зажиганию смеси с формированием чрезмерно больших тепловых потоков в направлении горелочных амбразур. Эти потоки вызывали активное термическое разрушение обмуровки и металлоконструкций горелок со снижением срока их службы и удорожания ремонтных затрат [3]. Тепловые разрушения горелочных конструкций приводили к изменению газодинамических характеристик факела с ухудшением показателей горения (появление СО и повышение потерь тепла с химическим недожогом топлива q_3). Замеры концентрации оксидов азота давали величины более 450 мг/м^3 , что соизмеримо с данными по пылеугольным котлам [2]. При наличии СО резко увеличивалось содержание бенз(а)пирена (БП) в дымовых газах [2]. В большей степени все перечисленные недостатки проявлялись на котлах, оборудованных вихревыми горелками.

Первые шаги в направлении улучшения ситуации с газовыми горелками на ТЭС РФ были предприняты в начале 80-х годов прошлого столетия. По рекомендациям кафедры ПТЭ ЮУрГУ (в то время ЧПИ) при активном участии сотрудников УралВТИ на пяти котлах второй очереди Челябинской ТЭЦ-2 вихревые горелки с предварительным смешением реагентов в отмеченный период были заменены на горелочные устройства с отдельным вводом в топку газовых струй и воздушных потоков [3]. Этим мероприятием был снят вопрос по надёжности (срок службы увеличен до 4–8 лет против 0,5–1,0 года), сверхнормативным образованиям СО и БП, потерям с q_3 . Вопрос о снижении выхода NO_x на этих котлах до последнего времени

оставался открытым, к нему вернулись лишь в 2005 году, когда экологический аспект технологии выработки электроэнергии и тепла стал занимать ведущую роль на ЧТЭЦ-2. В качестве эксперимента горелки котла ст.№8 перевели на прямоточную подачу воздушных и газовых потоков в топку: практически втрое с $\sim 350 \text{ мг/м}^3$ до $\sim 120 \text{ мг/м}^3$ сократилась концентрация выбросов оксидов азота в атмосферу

Специалисты ЮУрГУ участвовали также и в других крупных проектах перевода котлов БКЗ-220, БКЗ-160 и БКЗ-210-140Ф на технологию ступенчатого сжигания в факеле.

На котле БКЗ-220 (ТЭЦ г. Бишкек), оборудованном шестью встречными горелками с регулируемой степенью крутки, были дополнительно установлены два мощных встречных воздухоподающих сопла [4]. В соответствии с традиционной технологией дожигания топливных потоков сопла были размещены над горелками, через которые вводили окислитель с расходом 0,6–0,8 от теоретически необходимого для полного сгорания газа. Заводом-изготовителем уже была заранее учтена необходимость вывода участка активного перемешивания газа с воздухом за габариты горелок в топку, в связи с чем уже исходная их конструкция обеспечивала зажигание на таком удалении от амбразур, при котором достигается необходимая степень надёжности горелочных узлов. На данном объекте получены очень важные результаты по управлению газовым факелом. В частности, показано, что с увеличением крутки воздушного потока увеличивается и выход NO_x ; при включенных дожигающих соплах достигается выход $\text{NO}_x \leq 80 \text{ мг/м}^3$ при прямоточном разделённом истечении воздуха и газа, а различная степень крутки воздуха увеличивает этот параметр до $\text{NO}_x = 120\text{--}160 \text{ мг/м}^3$. Отключение воздушных дожигающих сопел приводило к дополнительному увеличению NO_x на ~40 %.

На котлах БКЗ-160 (ТЭЦ г. Бишкек) с тангенциальной схемой компоновки прямоточных горелок сжигание газа осуществлялось при невысокой исходной концентрации $\text{NO}_x = 140\text{--}160 \text{ мг/м}^3$. Здесь впервые было опробовано и внедрено мероприятие по рассредоточению узлов ввода в топку

газовых и воздушных струй. В результате внедрения $\text{NO}_x=50-70\%$ [5]. Тот же результат достигался на котле ст.№5 БКЗ-210-140Ф ЧТЭЦ-2 после демонтажа вихревых горелок и перехода к рассредоточенному тангенциальному вводу реагентов в топку. Однако здесь из-за сильного охлаждающего эффекта экранами, появившегося в связи с изменением газодинамики факела, уменьшился уровень температуры перегретого пара ниже нормативного по ЧТЭЦ-2. Для устранения недостатка пришлось увеличить расход и избыток воздуха в топке, что привело к увеличению концентрации оксидов азота до $\text{NO}_x \approx 140 \text{ мг/нм}^3$ [6].

На оборудованных прямоточными горелками котлах БКЗ-210-140Ф первой очереди ЧТЭЦ-2 (ст.№№1-4) с помощью комбинированного рассредоточения газовых и воздушных потоков непосредственно в горелках и по вынесенным дожигающим соплам удалось повысить надёжность газосопловых узлов и снизить выход NO_x с 280 мг/нм^3 до 110 мг/нм^3 без потерь по экономичности [7].

Выводы

1. Переход к раздельному вводу в топку потоков газа и воздуха существенно снижает выход NO_x , уменьшает тепловые потоки в направлении горелочных амбразур и повышает их надёжность.

2. Способы и конструктивное оформление узлов раздельного ввода реагентов в топку могут быть различными, это дает возможность минимизировать затраты при проведении модернизации.

3. При переводе котлов на факельную технологию сжигания газа с раздельным вводом реагентов следует учитывать активизацию теплообмена в топке и возможность регулирования температуры

дымовых газов и перегретого пара без вынужденного ухудшения экологических и экономических характеристик.

Литература

1. Спейшер, В.А. Повышение эффективности использования газа и мазута в энергетических установках/ В.А. Спейшер, А.Д. Горбатенко. – Энергоиздат, 1982.
2. Цирульников, Л.М./ Проверка отдельных способов снижения выброса окислов азота и бенз(з)пирена на газомазутных котлах/ Л.М. Цирульников, Р.А. Кадыров, В.Г. Конюхов и др.// Энергетик. – 1979 – №1. – С. 15–17
3. Комбинированное сжигание природного газа и пыли челябинского угля в вихревых горелках/ А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, Н.М. Щапин и др.// Электрические станции. – 1987 – №6. – С. 25–28.
4. Перевод котла БКЗ-220 на технологию ступенчатого сжигания топлива/ В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.Я. Гизин и др.// Электрические станции. – 1991. – №11. – С. 17–22.
5. Перевод котла БКЗ-160 на технологию ступенчатого сжигания топлива/ В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.Я. Гизин и др.// Электрические станции. – 1993. – №3. – С. 25–29.
6. Перевод котла БКЗ-210-140Ф Челябинской ТЭЦ-2 на технологию ступенчатого сжигания / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, Г.Ф. Кузнецов и др.// Электрические станции. – 1994. – №7. – С. 8–13.
7. Особенности и организация факельного процесса в топке с многофункциональными горелками/ В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, В.В. Петров, М.П. Сухарев// Электрические станции. – 2002. – №11 – С. 14–19

Торопов Евгений Васильевич – профессор, доктор технических наук, заслуженный деятель науки и техники РФ, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика» ЮУрГУ.

Осинцев Константин Владимирович – студент кафедры «Промышленная теплоэнергетика» ЮУрГУ. Область научного интереса – термогазодинамика топочного факела (расчёт, анализ, управление).

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАСЧЕТА РЕАКТИВНОСТИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА С УЧЕТОМ ЕЕ НЕКОРРЕКТНОСТИ

Р.Ш. Вахитов
г. Уфа, УГАИ

Предлагается метод обработки результатов измерений плотности нейтронов, позволяющей на каждом шаге определить реактивность реактора с точностью, согласованной с погрешностью измерений.

Информация о реактивности необходима для систем управления и защиты реакторов в целях повышения их ядерной безопасности. Ее определение по измерению плотности нейтронов относится к классу обратных некорректных задач.

Обработка результатов измерений, основанная на решении уравнений нейтронной кинетики относительно реактивности $k(t)$, связана с численным дифференцированием функции плотности нейтронов $n(t)$, заданной значениями n_i . Решение этой задачи оказывается неустойчивым. Попытка создания компьютерных систем определения реактивности, без учета некорректности задачи, привела к сбоям работы ЭВМ из-за случайных погрешностей в измерениях n_i [1]. Для борьбы с помехами в дополнение к аппаратным средствам применялся программный способ защиты, который по сути дела бесконтрольно корректировал исходные данные. Упрощения [2], например, предположение о том, что вклад скорости изменения плотности нейтронов в реактивность незначителен, оказываются грубыми для нестационарных режимов.

Для повышения устойчивости счета необходимо использование разностных схем, учитывающих некорректность задачи. Имеющиеся численные методы решения некорректных задач интерпретации наблюдений [3] базируются на предварительной регуляризации и предусматривают накопление и совместную обработку всей информации, заключенной в выборке измерений. Однако такой подход оказывается затрудненным для определения реактивности ввиду необходимости счета в реальном времени одновременно с измерением плотности нейтронов.

Уравнения нейтронной кинетики имеют вид:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k(t) - \beta_{\Sigma}}{L} n(t) + \sum_{\nu=1}^6 \lambda_{\nu} C_{\nu}(t); \quad (1)$$

$$\frac{dC_{\nu}}{dt} = \frac{\beta_{\nu}}{L} n(t) - \lambda_{\nu} C_{\nu}(t). \quad (2)$$

Начальные условия для $t=0$

$$n(0) = n_0; \quad C_{\nu}(0) = (\beta_{\nu} / \lambda_{\nu} L) n_0, \quad (3)$$

где $C_{\nu}(t)$ – концентрация ядер – предшественников запаздывающих нейтронов ν -й группы; $\beta_{\Sigma}, \beta_{\nu}, \lambda_{\nu}, L$ – константы.

Определение реактивности заключается в восстановлении K_i в точках $t_i, 0 \leq t \leq t_m$, образуя-

щих разбиение $t \equiv 0 < t_1 < t_2 < \dots < t_m$ с учетом измеренных значений плотности нейтронов n_i в тех же точках t_i . При этом известно, что

$$|n(t_i) - n_i| \leq \delta_i, \quad (4)$$

где δ_i – отклонение измеренной плотности нейтронов n_i от точной величины $n(t_i)$.

Предлагается принципиально новый метод обработки результатов измерений плотности нейтронов, позволяющий на каждом шаге опроса измерительных устройств определять реактивность реактора с точностью, согласованной с погрешностью измерения.

Обработка данных наблюдений на ЭВМ в реальном масштабе времени должна избегать запоминания большого объема эмпирической информации и многократной ее обработки. Поэтому наиболее эффективен рекуррентный подход к построению алгоритма обработки данных. При этом процесс вычисления распадается на ряд повторяющихся однотипных операций.

Через вектор, составляющими которого являются все измерения плотности нейтронов, поступившие до момента времени t_{i+1} , можно записать оценку вектора реактивности $K_i = \varphi(n^{(i)})$. В момент времени t_{i+1} появляется информация, составляющая вектор измерений $n^{(i+1)} = (n^{(i)}, n^{(i+1)})$, по которому определяется оценка $K_{i+1} = \varphi(n^{(i+1)})$. Рекуррентный подход заключается в построении алгоритма вида

$$K_{i+1} = \psi(K_i, n_{i+1}) \quad (5)$$

Система уравнений (1)–(3) разрешима с помощью одношаговых (Эйлера, Рунге-Кутты) или многошаговых (Адамса, Гира) методов параллельного типа: каждое уравнение системы на каждом шаге решается отдельно. Так, концентрация ядер – предшественников запаздывающих нейтронов, рассчитанная для $i+1$ -го шага, в счет плотности нейтронов на этом шаге не входит и применяется предполагаемое значение данной величины. Параллельные методы дают возможность проводить вычисления на нескольких процессорах, однако они не пригодны для решения обратных задач.

Для этой цели необходимы последовательные методы численного решения систем дифференциальных уравнений. На основе метода работы [4] можно построить новую разностную схему для

системы (1)–(3), предусматривающую использование результатов вычисления по каждому предыдущему уравнению во всех последующих уравнениях и позволяющую на ее основе перейти к решению обратной задачи:

$$C_{v,i+1} = C_{v,i} + \frac{\tau}{2} \left[F_v + \frac{\beta_v}{L} n_{i+1} - \lambda_v (C_{v,i} + \tau F_v) \right]. \quad (6)$$

$$k_{i+1} = 2L \left[\frac{n'_i}{n_{i+1}} - \frac{1}{2} \left(\frac{F_0}{n_{i+1}} - \frac{\beta \Sigma}{L} + \sum_{v=1}^6 \frac{\lambda_v}{n_{i+1}} C_{v,i+1} \right) \right]. \quad (7)$$

где τ – шаг;

$$F_0 = \frac{k_i - \beta \Sigma}{L} n_i + \sum_{v=1}^6 \lambda_v C_{v,i};$$

$$F_v = \frac{\beta_v}{L} n_i - \lambda_v C_{v,i}.$$

Формула (7) содержит операцию численного дифференцирования функции $n_i(t_i)$, заданной приближенно. Разность $n_{i+1} - n_i$ при $\tau \rightarrow 0$ может стремиться к нулю «несогласованно» с τ . Тогда возможно, что отношение $(n_{i+1} - n_i) / \tau \rightarrow \infty$ при $\tau \rightarrow 0$.

Следовательно, решение, полученное по формулам (6) – (7), может быть неустойчивым. Для построения класса приближенных, но устойчивых решений заменим в формуле (7) численное дифференцирование функции n_i , полученной в результате измерений, расчетом производной некоторой непрерывной функции $n(t_i)$, обеспечивающей наилучшее среднеквадратичное приближение к измеренным значениям n_i . При этом потребуем выполнения условия (4). Путем дифференцирования многочленов наилучшего среднеквадратичного приближения могут быть получены следующие формулы [5]:

$$n'_i \approx \frac{1}{12\tau} (3n_{i+1} + 10n_i - 18n_{i-1} + 6n_{i-2} - n_{i-3}); \quad (8)$$

$$n'_k \approx \frac{1}{12h} [(n_{k-2} - n_{k+2}) - 8(n_{k-1} - n_{k+1})]; \quad (9)$$

$$n'_p \approx \frac{1}{12q} [(n_{p+3} - 6n_{p+2} + 18n_{p+1} - 10n_p - 3n_{p-1})], \quad (10)$$

где τ, h, q – интервал дискретности; i, k, p – номер интервала.

В нестационарных режимах, особенно при прохождении экстремумов, результат измерения n_{i+1} может значительно уклониться от кривой среднеквадратичного приближения, построенной по предыдущим точкам. Соответственно производная, вычисленная, например, по формуле (8), будет существенно отличаться от точной величины $(n_{i+1} - n_i) / \tau$. Потребуем, чтобы это отличие не вносило в расчет погрешность, превышающую погрешность измерения плотности нейтронов:

$$\left| n_i + \tau n'_i - n_{i+1} \right| \leq \delta_{i+1}. \quad (11)$$

Алгоритм расчета производной с требуемой точностью построим на основе деления шага дис-

кретности τ и последовательном применении формул (8)–(10). Деление шага дискретности позволяет ввести на интервале опроса измерительных устройств $[i, i+1]$ дополнительно несколько фиктивных точек, имитирующих измерения. Введение имитаций измерения дает возможность усилить влияние замера плотности нейтронов в $i+1$ -й точке на расчет производной. При этом используется особенность каждой из формул (8)–(10), заключающаяся в различном влиянии на значение производной точки слева и справа от расчетной. Так, если принять $\tau = 2h$ и в формуле (9) совместить индексы опроса $i = k, i+1 = k+2$, а имитацию измерений выполнить в виде

$$n_{k-2} = n_{i-1}; \quad n_{k-1} = \frac{n_{i-1} + n_i}{2}; \quad n_k = n_i;$$

$$n_{k+1} = \frac{n_i + n_{i+1}}{2}, \quad n_{k+2} = n_{i+1}, \quad (12)$$

то с применением формулы (9) влияние замера в $i+1$ -й точке на расчет производной усиливается по сравнению с формулой (8) с помощью имитации измерения n_{k+1} . Соответственно при $\tau = 3q$ и использовании формулы (10) с имитацией замеров

$$n_{p-1} = n_{i-1} + 2/3(n_i - n_{i-1}); \quad n_p = n_i;$$

$$n_{p+1} = n_i + 1/3(n_{i+1} - n_i); \quad (13)$$

$$n_{p+2} = n_i + 2/3(n_{i+1} - n_i); \quad n_{p+3} = n_{i+1},$$

дополнительно к одному реальному измерению вводятся две имитации измерения на интервале опроса датчиков. При этом вклад результата измерения n_{k+1} в формирование производной возрастает еще больше по сравнению с формулами (8) и (9).

В условиях физического эксперимента реактивность имеет конечную производную. Разностный аналог реактивности может быть представлен в виде

$$K_{i+1} = K_i + \tau k'_i. \quad (14)$$

На основе алгоритма общего вида (5) применение формулы (8) в выражении (14) дает рекуррентную формулу для расчета реактивности:

$$K_{i+1} = K_i +$$

$$+ \frac{1}{12} (3k_{i+1} + 10K_i + 18K_{i-1} + 6K_{i-2} - K_{i-3}), \quad (15)$$

где k_{i+1} определяется из формул (6), (7) исходя из n_{i+1} и производной n'_i по методу алгоритмической регуляризации:

шаг 1 – по замерам плотности нейтронов и формуле (8) рассчитывается n'_i . Если найденная величина удовлетворяет условию (11), то реактивность вычисляется по формулам (6), (7) и (15). Если условие (11) нарушается, то влияние точки на расчет производной усиливается последовательным применением формул (9) и (10);

шаг 2 – путем интерполяции с помощью формулы (12) вводятся две имитации измерений в серединах интервалов $[i-1, i]$ и $[i, i+1]$. Производная вычисляется по формуле (9). Если полученное

значение удовлетворяет условию (11), то разрешается переход к счету реактивности по формулам (6), (7) и (15). В противном случае следует

шаг 3 – интервалы измерения $[i-1, i]$ и $[i, i+1]$ делятся на три равные части. По формулам (13) имитируются три замера плотности нейтронов, необходимые для расчета производной по формуле (10). Если значение производной удовлетворяет условию (11), то выполняется переход к формулам (6), (7) и (15). При невыполнении условия (11) следует

шаг 4 – производная n'_i рассчитывается по формуле

$$n'_i = (n_{i+1} \mp \delta_{i+1} - n_i) / \tau,$$

реализующей наибольшее допустимое сглаживание. Знак перед δ_{i+1} выбирается из условия соответствия наименьшему абсолютному значению производной. Реактивность восстанавливается по формулам (6), (7) и (15)

Для предложенного алгоритма определения реактивности затруднительно провести априорный анализ устойчивости и точности. Исходные данные в виде результатов замера плотности нейтронов задаются приближенно. На каждом шаге измерения вводится лишь одно случайное приближение плотности нейтронов при неопределенности точного значения. Действительная погрешность измерения на данном шаге остается неизвестной. Однако именно эта погрешность наряду с качеством разностной схемы определяет точность и устойчивость счета реактивности. Поэтому предложенный метод алгоритмической регуляризации исследовался на основе модельного эксперимента, позволяющего имитировать различные режимы ядерного реактора, в том числе и аварийные. При этом оказывается возможным и введение погрешности в модель процесса измерения в целях оценки зависимости погрешности определения реактивности от точности измерения плотности нейтронов. На первом этапе модельного эксперимента решается прямая задача для уравнений (1)–(3): по заданной функции $k(t)$ находят $n(t)$. Для решения прямой задачи применяется разностная схема, описанная в работе [4]. На втором этапе в решение прямой задачи – найденную функцию $n(t)$ вносится погрешность заданного уровня

$$n_i(t_i) = n(t_i)(1 + \gamma \Theta),$$

где γ – уровень погрешности; Θ – случайные числа из интеграла $[-1; 1]$, распределенные по нормальному закону. На третьем этапе решается обратная задача для уравнений нейтронной кинетики: по заданным значениям n_i, t_i восстанавливается оценка реактивности $K_i(t)$.

В текстовой задаче уровень погрешности, вносимой в модель измерения, менялся в диапазоне 0–15%. При этом численный эксперимент дает возможность определить допустимую погрешность измерения плотности нейтронов при заданных требованиях к точности расчета реактивности.

Тестирование, выполненное по описанной схеме, показало, что предложенный метод определения реактивности обладает регуляризирующими свойствами. По каждой паре n_{i+1}, δ_{i+1} находят определенную оценку K_{i+1} , такую, что $K_{i-1} \rightarrow k(t_{i+1})$ при $\delta_{i+1} \rightarrow 0$. В отличие от рекуррентного метода Калмана, основанного на оптимальном оценивании, метод алгоритмической регуляризации позволяет получить оценку, согласованную по точности с погрешностью измерения.

Предложенный метод реализован в устройстве для измерения реактивности ядерного реактива.

Литература

1. Применение малых ЭВМ для измерения реактивности / А.И. Могильнер, Г.Н. Фокин, Ю.В. Чайка, Ф.М. Кузнецов // *Атомная энергия*. – 1974. – Т. 36, вып. 5. – С. 358–362.
2. Lehto W. A Review of Reactivity Meters for Operational Fast Breeder Reactors / W Lehto. – *Technology*, 1971–1972. – V 14, № 4. – P 345–353.
3. Тихонов, А.Н. Математическая физика и автоматизация обработки наблюдений / А.Н. Тихонов // *Современные проблемы математической физики и вычислительной математики*. – М.: Наука, 1982. – С. 292–301.
4. Об одном численном методе решения системы дифференциальных уравнений для моделирования САУ / Р.Ш. Вахитов, А.П. Костицын, И.А. Шангин, В.Л. Горбунов // *Управление сложными техническими системами. Межвузовский научный сборник*. №9 – Уфа, УАИ, 1986. – С. 98–106.
5. Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1977 – 696 с.

Вахитов Радик Шакирович, кандидат технических наук, доцент Уфимского государственного авиационного института.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ТЕЛ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ НА ПРИНЦИПЕ ДИАКОПТИКИ

В.И. Горбенко

г. Челябинск, ЮУрГУ

Рассматривается подход к решению нелинейных многомерных задач теплопроводности конструкций промышленных объектов на принципе диакоптики – решение сложных задач по частям. Конструкция сложной формы представляется комбинацией фигур-примитивов, для которых разработаны простые программные модули. Сопряжение модулей происходит через граничные тепловые сопротивления фигур на основе полученных обобщенных зависимостей. Приводится алгоритм решения задачи.

Решение задач теплопроводности для тел, имеющих сложную пространственную форму и переменные краевые условия теплообмена, требует значительных затрат труда и времени. Одним из действенных способов сокращения трудозатрат является использование принципа диакоптики, когда решение одной сложной задачи заменяется решением более простых задач [1]. Рассмотрим один из вариантов такого подхода.

Большинство конструктивных элементов и узлов энергетических установок и различных теплотехнических устройств являются замкнутыми пространственными телами, которые могут быть образованы путем «объединения» простых фигур-примитивов: параллелепипедов, призм, цилиндрических и сфероидальных элементов, тетраэдров, октаэдров и т.д. Число разновидностей таких фигур невелико, часто не превосходит десятка. Составить программы расчета для них значительно проще, чем для всей конструкции. Единжды созданные и отлаженные программы-модули таких фигур могут в дальнейшем многократно использоваться при расчете теплового состояния тел различного конструктивного исполнения.

Решение задачи начинается с построение структурной модели исследуемой конструкции. Она условно расчленяется на фигуры-примитивы (пространственная декомпозиция). Принцип расчленения показан на рис. 1. Изображенная конструкция может быть представлена комбинацией четырех типов фигур: А, В, С и D. Каждой фигуре присваивается ее порядковый номер и признак класса, определяющий его тип (форму). Эти данные в совокупности с размерами фигур являются входными параметрами структурной модели изучаемой конструкции.

На следующем этапе решаются задачи теплопроводности каждой фигуры с последующей операцией синтеза их тепловых полей. Алгоритм численного расчета нестационарного температурного поля конструкции произвольной формы представлен на рис. 2. Входные данные включают геометрические и топологические параметры фигур, их теплофизические характеристики, граничные ус-

ловия теплообмена и числовой массив управляющих признаков. Блок 4 открывает временной цикл расчетной схемы, начинающийся временным счетчиком $\tau = \tau + \Delta\tau$. Здесь $\Delta\tau$ – временной шаг, который может изменяться во времени или оставаться постоянным. Основная часть алгоритма включает блоки 7–15. Блок 7 организует цикл расчета теплового состояния по каждой из М фигур. В блоке 8 определяются условия сопряжения К-й фигуры и формируются граничные массивы температур. В зависимости от типа фигуры (блок 9) вызывается соответствующий тип модуля: PAR (расчет параллелепипеда), PRIZ (расчет призмы), SFER (расчет сфероидального элемента), ЦИЛ (расчет цилиндра). В архив модулей могут входить другие подпрограммы (блок 10). Блок 15 проверяет условие сходимости итерационного процесса для каждой фигуры. Вывод расчетной информации регламентируется блоком 16, где $\Delta\tau_{\text{в}}$ – очередной момент вывода расчетных данных. После работы блока 17 проверяется условие окончания счета по конечному времени процесса $T_{\text{к}}$. Если условие не выполняется, то значение $T_{\text{в}}$ увеличивается на временной шаг вывода $\Delta\tau_{\text{в}}$.

Ключевым местом в реализации рассматриваемого подхода является вопрос о сопряжении отдельных фигур между собой. Важную роль в решении этого вопроса играет выбор метода расчета теплового состояния фигур. Расчетная схема метода должна быть достаточно универсальной и учитывать различия формы переноса энергии как на границе, так и внутри фигур, а также отвечать характеру сопряжения фигур. При использовании традиционных методов конечных разностей или конечных элементов сопряжение возможно осуществить лишь через общие граничные расчетные точки сеток разбиения стыкующихся фигур. Это обстоятельство вызывает необходимость привязки сеток, что существенно ограничивает возможности методов.

Перечисленным выше требованиям в наибольшей степени соответствует одна из модификаций метода элементарных тепловых балансов

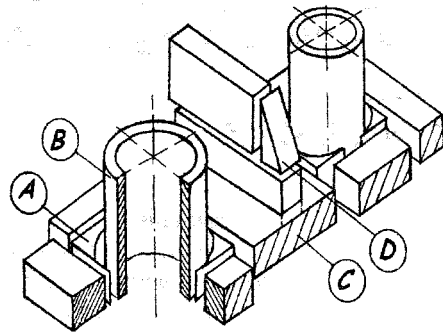
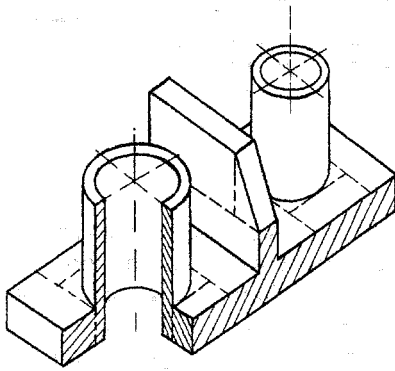


Рис. 1. Пространственная декомпозиция узла

[2]. Единый подход к анализу сложных тепловых явлений с общих принципов закона сохранения и превращения энергии делает его универсальным и в то же время простым и доступным широкому кругу специалистов. Численная модель метода основывается на приближенном интегрировании уравнения баланса энергии

$$\int_F q_n(A) dF + \int_V q_v dV = \int_V \rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} dV, \quad (1)$$

записанного для произвольного тела объемом V . Первое слагаемое определяет тепловой поток, проходящий через поверхность тела. Здесь $q_n(A)$ – проекция вектора плотности теплового потока на нормаль n в точке A ($A \in F$). Вторым слагаемым учитывается действие внутренних источников тепла мощностью q_v . Интеграл в правой части уравнения (1) определяет изменение энтальпии тела во времени t .

Для расчета теплового состояния тело условно разбивается на достаточно малые объемы так, чтобы можно было считать температуру и мощность внутренних тепловыделений в них одинаковыми и постоянными в течение некоторого промежутка времени Δt . Температура определяется в узловых точках, лежащих внутри объемов разбиения. Таким образом, сопряжение фигур происходит не через узловые точки, а посредством контакта границ ячеек пространственной сетки. Модель теплообмена между фигурами получается адекватной модели передачи тепла между ячейками сетки. Задача сопряжения практически сводится к расчету тепловых сопротивлений между поверхностными ячейками разбиения стыкующихся фигур.

Методика определения тепловых сопротивлений сетки разбиения основывается на следующих допущениях. Примем в качестве структурной модели передачи тепла между двумя сопряженными ячейками двухслойную стенку.

Слоями являются части ячеек (объемов) от границы их сопряжения до эквидистантных ей изотермических поверхностей, проходящих через

узловые точки с температурами T_1 и T_2 на расстояниях h_1 и h_2 соответственно. Тогда тепловое сопротивление между узловыми точками будет эквивалентно тепловому сопротивлению стенки и определится из уравнения Фурье

$$Q = -\lambda(T) \frac{dT}{dn} F(n).$$

После разделения переменных

$$Q/F(n) \cdot dn = -\lambda(T) dT$$

и интегрирования в границах i -го слоя

$$Q \int_0^{h_i} \frac{dn}{F_i(n)} = - \int_{T_i}^{T_k} \lambda_i(T) dT$$

получаем

$$Q = \frac{\int_{T_k}^{T_i} \lambda_i(T) dT}{\int_0^{h_i} \frac{dn}{F_i(n)}}.$$

С другой стороны, тот же тепловой поток равен

$$Q = (T_i - T_k) / R_i.$$

Из двух последних соотношений определяется величина теплового сопротивления i -го слоя

$$R_i = (T_i - T_k) \cdot \frac{\int_0^{h_i} \frac{dn}{F_i(n)}}{\int_{T_k}^{T_i} \lambda_i(T) dT}$$

или

$$R_i = \int_0^{h_i} \frac{dn}{F_i(n)} / \lambda_{i,cp}.$$

Аналогичным образом можно получить зависимость теплового сопротивления j -го слоя:

$$R_j = \int_0^{h_j} \frac{dn}{F_j(n)} / \lambda_{j,cp}.$$

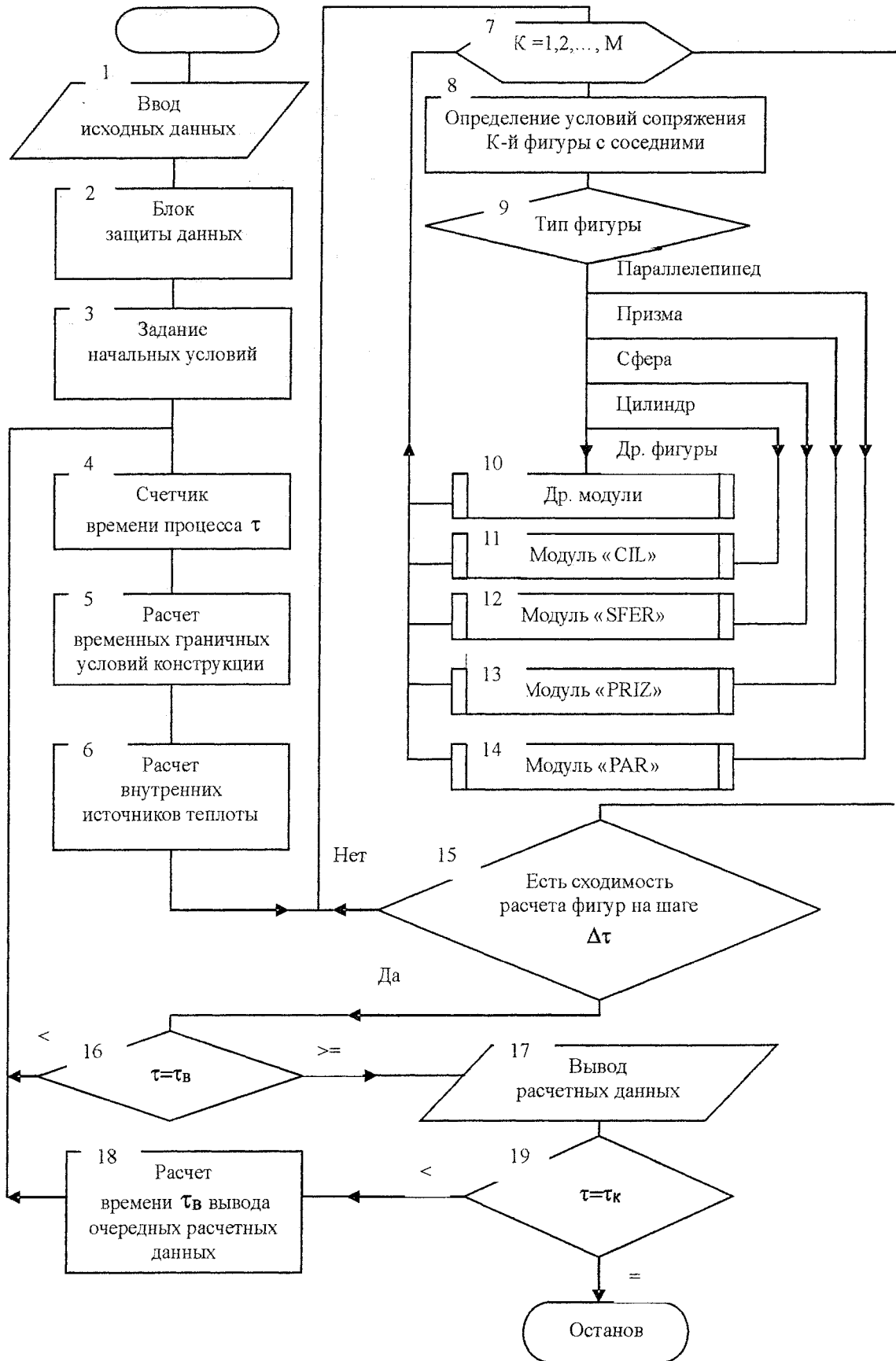


Рис. 2. Алгоритм решения задач нестационарной теплопроводности по принципу диакоптики

Полное внутреннее тепловое сопротивление между двумя соседними ячейками сетки в n -м направлении и величина теплового потока составит

$$R_{ij} = R_i + R_j = \frac{1}{\lambda_{i\text{ср}}} \int_0^{h_i} \frac{dn}{F_i(n)} + \frac{1}{\lambda_{j\text{ср}}} \int_0^{h_j} \frac{dn}{F_j(n)},$$

где

$$\lambda_{i\text{ср}} = \frac{\int_{T_k}^{T_i} \lambda_i(T) dT}{(T_i - T_k)},$$
$$\lambda_{j\text{ср}} = \frac{\int_{T_j}^{T_k} \lambda_j(T) dT}{(T_k - T_j)}.$$

Горбенко Виктор Иванович в 1969 г окончил Челябинский политехнический институт (ныне Южно-Уральский государственный университет). С 1969 г по настоящее время работает на кафедре промышленной теплоэнергетики. Канд. техн. наук, доцент. Научные интересы связаны с компьютерным моделированием теплового состояния конструкций и узлов промышленных установок.

На основе изложенного подхода разработан алгоритм и вариант программы расчета нестационарных температурных полей конструкции в граничных условиях 1-го и 3-го рода. Использование принципа диакоптики в решении задач теплопроводности конструкций сложной геометрической формы существенно сокращает объем работ по моделированию на ЭВМ их теплового состояния.

Литература

1. Крон, Г. Исследование сложных систем по частям – диакоптика / Г. Крон. – М.: Наука, 1972. – 215 с.
2. Ваничев, А.П. Приближенный метод решения задач теплопроводности при переменных константах / А.П. Ваничев. – АН СССР. ОТН. – 1946. – № 12.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ МАШИН С АКСИАЛЬНЫМ ЗАЗОРОМ

С.А. Ганджа
г. Челябинск, ЮУрГУ

Описан программный пакет проектирования вентильных электрических машин с аксиальным зазором, в котором для анализа используется метод конечных элементов, для синтеза – многоуровневая оптимизация.

Вентильные машины с аксиальным зазором (ВМАЗ) в последнее время начали интенсивно развиваться в связи с промышленным освоением постоянных магнитов на основе высококоэрцитивных материалов типа самарий–кобальт, неодим–железо–бор.

Рынок предъявляет ряд требований к ВМАЗ, которые должны быть учтены при разработке, как самих изделий, так и систем их проектирования. Среди них: большое количество конструктивных модификаций, необходимость сокращения сроков и циклов проектирования при возрастающем требовании к качеству изделий, сокращение стоимости, как самого изделия, так и работ, связанных с его разработкой и производством. Эти противоречивые требования можно выполнить, если разработать систему автоматизированного проектирования (САПР) ВМАЗ с ориентацией на, так называемые, сквозные технологии. Поэтому разработки в этом направлении являются актуальными и представляют научный интерес и практическую значимость.

Большое количество конструктивных модификаций ВМАЗ можно классифицировать по форме активных элементов, создающих электромагнитный момент. По форме постоянных магнитов

различают ЭМАЗ с цилиндрическими, призматическими и сегментными магнитами. Фазные катушки ЭМАЗ могут иметь кольцевую, трапециевидную, волновую и тороидальную формы. Кольцевые фазные катушки могут быть диамагнитными (без каркаса с заливкой компаундом) или могут быть намотаны на магнитный сердечник.

Классификация конструкций ЭМАЗ представлена на рис. 1.

Следует отметить, что большое количество различных конструкций является не единственной трудностью при разработке программных средств проектирования ВМАЗ. Часто оптимальный, с точки зрения математической постановки задачи, вариант является неприемлемым для заказчика по причине ограничений габаритов, использования уже имеющихся заделов по комплектующим (например, по размерам постоянных магнитов), ограниченных возможностей собственного производства. Поэтому программы оптимизации ВМАЗ должны включать в себя как большое количество конструктивных модификаций и используемых материалов (назовем это требование развитием «по горизонтали»), так и различные уровни габаритной оптимизации (назовем это требование развитием «по вертикали»).



Рис. 1

Задачу проектирования ВМАЗ можно разбить на две взаимосвязанные задачи: анализ, то есть разработки методики поверочного расчета, при которой полностью известна геометрия, и необходимо определить рабочие характеристики, и синтез, то есть разработки методики оптимального проектирования, при которой для определенных техническим заданием параметров необходимо рассчитать геометрию.

Известно, что качество решения задачи анализа зависит от точности расчета магнитного поля в электрической машине.

Применительно к анализу ВМАЗ были опробованы различные методики расчета поля [1–3], но положительный результат, не смотря на сложность реализации, дали методики, основанные на методе конечных элементов (МКЭ).

Выделим основные преимущества МКЭ по сравнению с другими методами расчета магнитного поля:

- возможность рассчитывать магнитные системы практически любой геометрии;
- возможность закладывать свойства любых материалов для постоянных магнитов, электротехнических и конструкционных сталей и для якорных обмоток;
- возможность анализировать магнитное состояние как всей системы, так и отдельных ее элементов;
- возможность решать связанные задачи, например расчет электромагнитного и теплового поля;
- хорошая сходимость расчета с результатами тестирования.

Сложность реализации этого метода компенсируется постоянно возрастающими возможностями вычислительной техники, наличием специальных отработанных лицензионных программ для реализации этого метода.

После определения параметров магнитного поля (индукции, магнитного потока, потокосцепления), расчет рабочих характеристик производится по традиционным методикам с использованием схем замещения.

Экспериментальное исследование опытного образца вентильного генератора с параметрами 350 Вт, 24 В, 3500 об/мин на холостом ходу и под нагрузкой показала погрешность расчета по индукции в воздушном зазоре около 5 %, по ЭДС вращения порядка 9 %, по выходной мощности порядка 8 %, по КПД порядка 5 %.

Таким образом, сочетание конечно-элементного анализа магнитного поля с классическими методиками с использованием схем замещения позволяют качественно решить задачу анализа ВМАЗ.

Задача оптимального проектирования ВМАЗ (задача синтеза) была поставлена в классической формулировке [4]: для заданных параметров (конкретного исполнения, материалов, исходных данных технического задания), при технологических ограничениях (минимально и максимально возможных размерах магнита, проводника), делая перебор независимых переменных по определенному алгоритму, определить геометрию, которая обеспечивала бы минимальное значение конкретного выбранного критерия.

Блок-схема алгоритма оптимального проектирования представлена на рис. 2. Она была по-



Рис. 2

ложена в основу пакета программ оптимального проектирования ВМАЗ.

Основным принципом, заложенным в программу, является максимальная гибкость, которая позволяет охватить различные проектные ситуации.

С одной стороны, в программу введены различные конструктивные модификации ВМАЗ. Общее число их при разных сочетаниях типов моделей, формы магнита и проводника составляет 10 вариантов. В базу по магнитам заложены различные материалы, включая керамику, магнитопласты, самарий–кобальт, неодим–железо–бор. База материалов имеет возможность пополняться. В базу по проводникам заложены удельные сопротивления меди, алюминия, а также для исследовательских целей, серебра и железа. Программа позволяет рассчитывать генераторный и двигательный режимы работы. Включение различных модификаций развивает пакет оптимизации « по горизонтали ».

С другой стороны, в пакете реализована, так называемая, многоуровневая оптимизация: от полной оптимизации без фиксации основных геометрических размеров, через частные оптимизации с фиксацией некоторых размеров до поверочного расчета, при котором вся геометрия задана. Всего таких уровней в программе 6:

- полная габаритная оптимизация;
- габаритная оптимизация при фиксированном числе полюсов;
- оптимизация при фиксированном наружном диаметре;
- оптимизация при фиксированном внутреннем диаметре;
- оптимизация при фиксированном наружном и внутреннем диаметре;
- оптимизация при заданных размерах постоянного магнита.

Возможность выбора различных уровней оптимизации развивает пакет оптимизации « по вертикали ».

В качестве критериев оптимальности выбраны следующие показатели качества:

- минимальная масса активных частей;
- минимальный объем активных частей;
- минимальная масса постоянного магнита;
- минимальная масса обмотки;

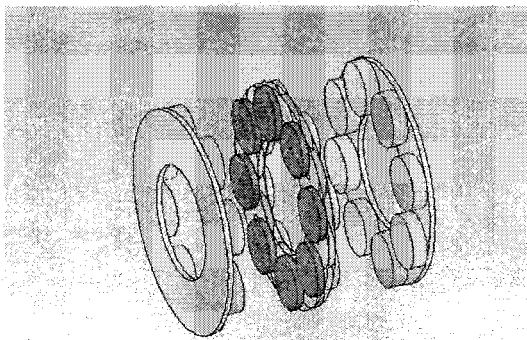


Рис. 3

– минимальная суммарная стоимость постоянных магнитов и обмотки.

В качестве констант в программе фигурируют данные технического задания и, в зависимости от уровня оптимизации, фиксированные геометрические размеры.

В качестве ограничений выступают требования по технологическим размерам и максимально допустимая плотность тока.

В качестве метода оптимального перебора независимых переменных выбран метод покоординатного спуска в сочетании с методом Фибоначчи и методом штрафных функций.

Процесс оптимального проектирования ВМАЗ, как правило, осуществляется по следующему алгоритму. Разработчик в соответствии с особенностями ТЗ и на основании своего конструкторского опыта предварительно выбирает материал для магнитов, обмотки, форму проводника, магнита и тип модели. Далее реализует полную габаритную оптимизацию. В процессе анализа результатов он фиксирует некоторые основные геометрические размеры и перебирает уровни частных оптимизаций. Заключительным этапом расчета является подробный поверочный расчет.

Определение оптимальной геометрии активных элементов ВМАЗ позволяет перейти к следующему шагу сквозного проектирования: решению связанной задачи анализа магнитных и тепловых полей. Этот этап в технологической цепочке необходим для повышения качества проектирования и сокращения циклов макетирования. Для реализации этого этапа необходимо построить трехмерную модель ВМАЗ. Визуализация результатов расчета в виде трехмерных моделей позволяет опытному разработчику уже на этом этапе оценить качество работы программы оптимизации.

Построение трехмерных моделей ВМАЗ в программном комплексе осуществляется в формате Solidworks в автоматическом режиме. Примеры построения трехмерных моделей ВМАЗ различных конструкций приведены на рис. 3–5.

На рис. 3 представлена ВМАЗ с цилиндрическими магнитами и кольцевыми катушками.

На рис. 4 представлена ВМАЗ с сегментными магнитами и трапециевидными катушками.

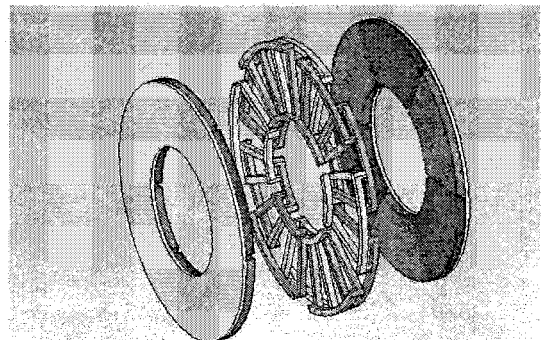


Рис. 4

На рис. 5 представлена ВМАЗ с сегментными магнитами и тороидальными катушками.

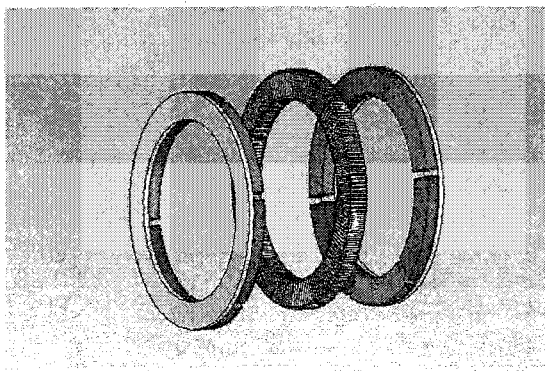


Рис. 5

Построенные автоматизированным способом трехмерные модели значительно облегчают конструктору разработку конкретного образца, не позволяя ему сделать ошибку при построении геометрии активных элементов, обеспечивающих энергетику и основные параметры электрической машины.

Для решения связанной задачи по анализу магнитных и тепловых полей в разработанном комплексе используется программа Ansys. Фрагмент анализа магнитного поля образца ВМАЗ представлен на рис. 6.

Фрагмент анализа теплового поля образца ВМАЗ представлен на рис. 7.

Особенностью анализа ВМАЗ является совместная работа его с электронным коммутатором в режиме двигателя и выпрямительным блоком в

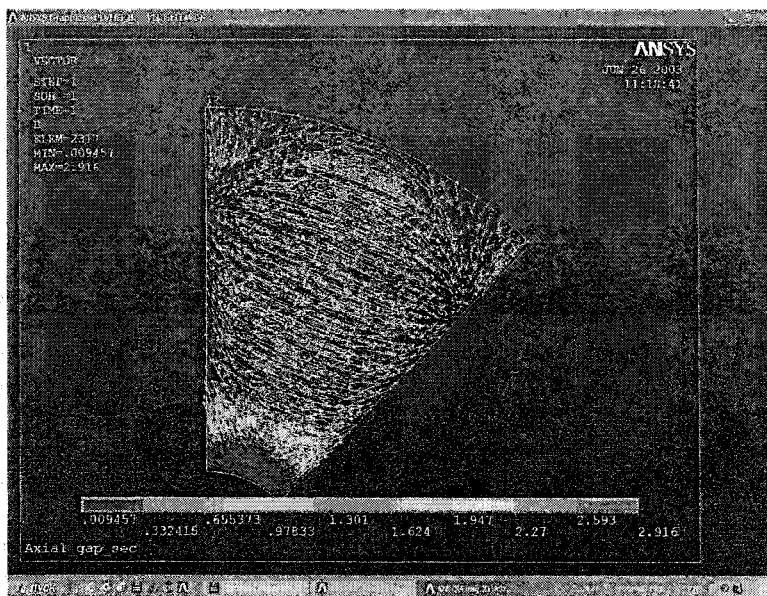


Рис. 6

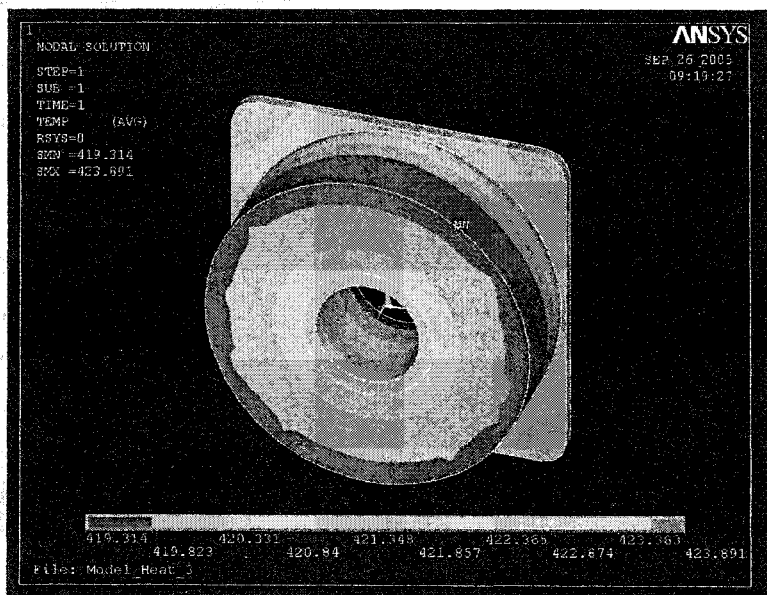


Рис. 7

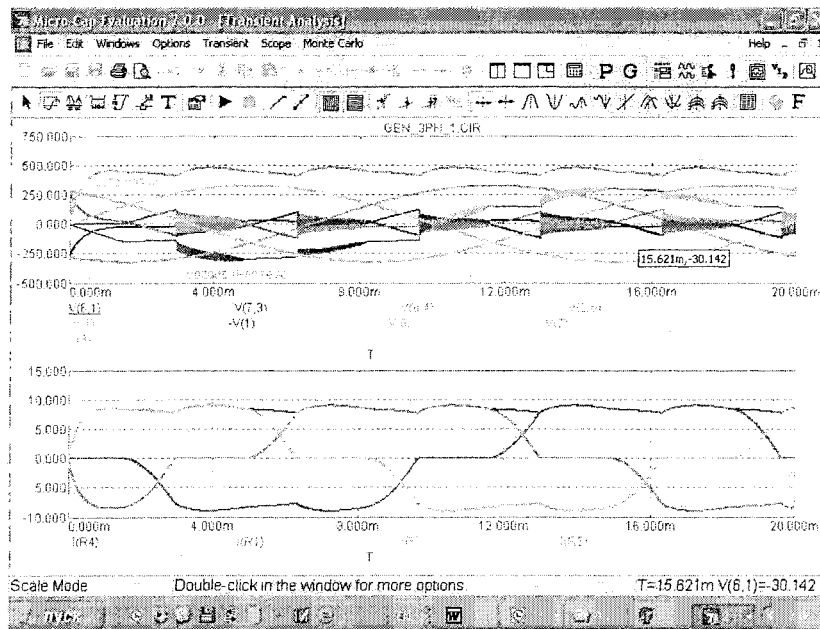


Рис. 8

режиме генератора. Электронные компоненты существенным образом влияют на работу ВМАЗ в плане обеспечения основных характеристик и коммутационных процессов. Учесть это влияние на этапе синтеза довольно трудоемко из-за сложности физики переходных процессов и увеличения числа независимых переменных в оптимизационных циклах. Но для анализа этих процессов, существуют хорошо отработанные профессиональные пакеты моделирования электронных схем. В описанном программном комплексе имеется процедура подключения к программе MicroCap. При этом из оптимизационной программы в программу MicroCap передается информация об ЭДС вращения в фазах. Фрагменты такого анализа представлены на рис. 8 для режима генератора, работающего на выпрямительный мост, собранный по схеме Ларионова.

Программный комплекс прошел апробацию при разработке около 20 проектов. Среди них: генератор для ветроэнергетической установки на 1 кВт и 3 кВт, стартер-генератор для самолета мониторинга окружающей среды, оптический привод для космического применения, электропривод для робототехнического устройства и другие.

Основные выводы

1. Разработанная математическая модель анализа ВМАЗ, включающая в себя сочетание

МКЭ и традиционных схем замещения, показала хорошую сходимость расчета и эксперимента.

2. Развитый как «по горизонтали», так и «по вертикали» алгоритм оптимального проектирования охватывает широкий круг проектных ситуаций.

3. Подключение к пакету программ Solidworks, Ansis и MicroCap позволяет комплексно решать задачу проектирования ВМАЗ, делая цикл проектирования практически замкнутым, что создает хороший задел для сквозного проектирования.

Литература

- 1 Ганджа, С.А. Применение метода граничной коллокации для расчета магнитных полей в электрических машинах/ С.А. Ганджа// Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентиляльных преобразователей. – Челябинск: ЧПИ, 1983.
- 2 Альтшуллер, И.Б. Расчет электромагнитных полей в электрических машинах/ И.Б. Альтшуллер. – М.: Энергия, 1980.
- 3 Зильберман, С.З. Разработка и исследование бесконтактных моментных двигателей постоянного тока. Автореферат дис. ...к.т.н./ С.З. Зильберман. – Свердловск: УПИ, 1978.
- 4 Геминтерн, В.И. Методы оптимального проектирования/ В.И. Геминтерн, Б.М. Каган. – М.: Энергия, 1980. – 160 с.

Ганджа Сергей Анатольевич, в 1978 г окончил Челябинский политехнический институт (ЧПИ), в 1985 г – аспирантуру (ЧПИ). С 1985 г по 2001г работал в СКБ «Ротор» и ОАО «Электромашина» в должностях ведущего инженера, начальника бюро, начальника отдела. В настоящее время работает техническим директором НИИ «Уралмет». Доцент кафедры ЭМи-ЭМС ЮУрГУ, к.т.н. Научные интересы связаны с разработкой вентиляльных машин постоянного тока.

ИМПУЛЬСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Ю.С. Усынин, А.В. Валов
г. Челябинск, ЮУрГУ

Приводятся принцип работы, расчетные характеристики, уравнения математической модели асинхронного электропривода с импульсным управлением. Обращается внимание на его высокие энергетические и благоприятные эксплуатационные характеристики.

Введение. В промышленности эксплуатируется много рабочих механизмов (подъемно-транспортные машины, транспортеры, насосы), приводящиеся от асинхронного двигателя с фазным ротором. Как правило, регулирование скорости в них производится реостатным способом. Между тем современные средства управления позволяют заметно улучшить регулировочные характеристики этих приводов без больших затрат. Ниже рассмотрен один из таких способов.

Принципиальная схема электропривода. В электроприводе, в котором используется асинхронный двигатель с фазным ротором, регулирование скорости производится с помощью тири-

сторного преобразователя, собранного по мостовой трехфазной схеме (рис. 1а). Входные цепи преобразователя подключаются к сети через обмотки статора двигателя AX, BY, CZ . На выход выпрямленного напряжения преобразователя подключаются обмотки ротора двигателя ax, yb . Обмотка cz может подключаться параллельно или оставаться свободной.

Управление тиристорными мостами производится таким образом, что МДС, создаваемая током в обмотках статора, всегда создает вращающий момент двигателя. Сказанное подтверждают пространственные векторные диаграммы МДС двигателя (рис. 2).

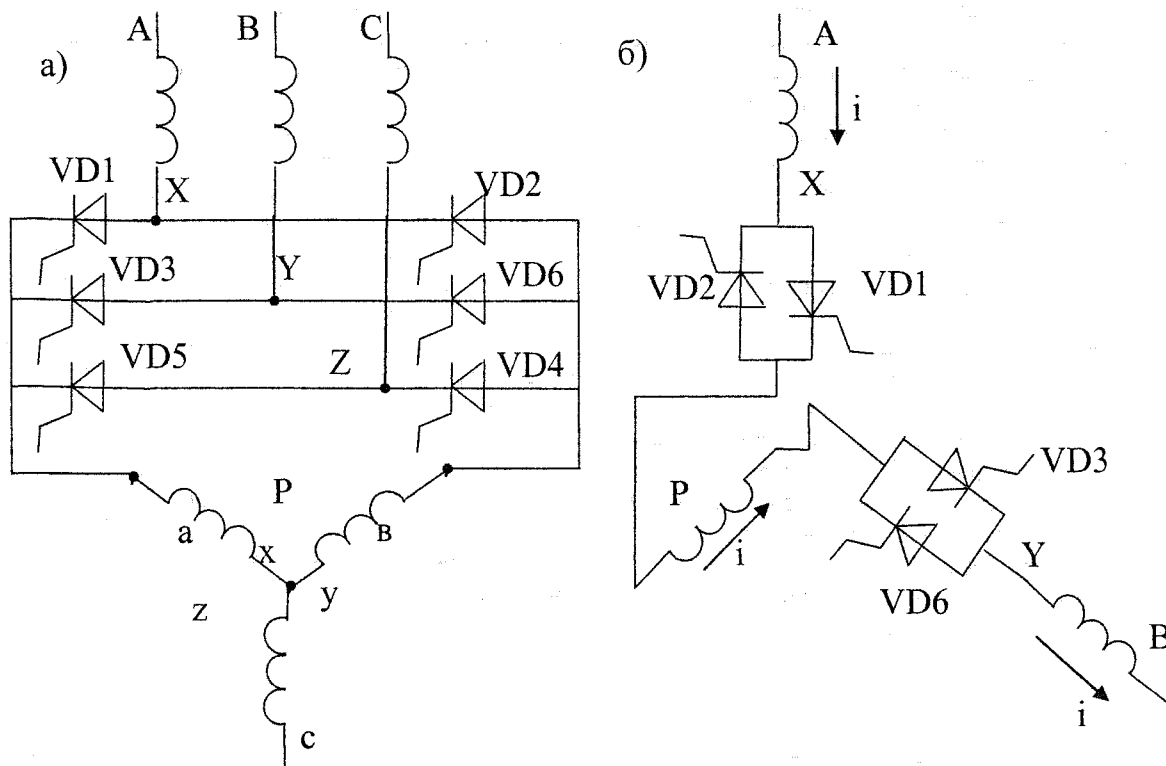


Рис. 1. Схема функциональная электропривода: а) общая схема силовых цепей; б) схема подключения обмоток фаз А и В

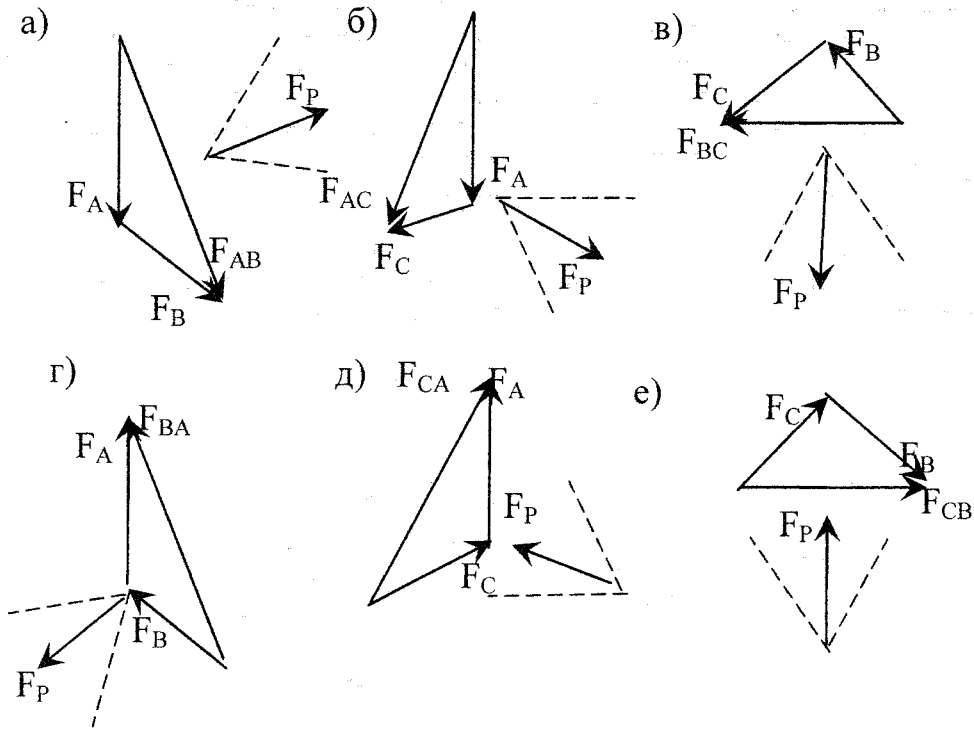


Рис. 2. Пространственные векторные диаграммы электродвигателя при различных положениях ротора: а) $\alpha = 240^\circ$; б) $\alpha = 300^\circ$; в) $\alpha = 0^\circ$; г) $\alpha = 60^\circ$; д) $\alpha = 120^\circ$; е) $\alpha = 180^\circ$

Переключая тиристоры моста, токами в обмотках статора в последовательности, указанной на рис. 2, создают МДС статора, вращающуюся дискретно с шагом 60° . Эти переключения производят тогда, когда ориентация векторов МДС обмоток статора и ротора соответствует двигателю моменту.

Уравнения состояния электропривода. Математическая модель электропривода составлена на основании схемы (рис. 1б). Здесь принят ряд допущений: не учитывается рассеяние потока в зазоре электродвигателя, тиристоры считаем идеальными ключами, взаимные индуктивности между фазами статора и ротора изменяются по синусоидальному закону.

Ток i , протекающий через обмотки, рассчитывается на основании уравнения:

$$U_{AB} = 2 \cdot i \cdot (r_1 + r_2) + \frac{d\Psi_A}{dt} + \frac{d\Psi_B}{dt} + \frac{d\Psi_P}{dt},$$

где r_1, r_2 – активные сопротивления статора и ротора; Ψ_A, Ψ_B, Ψ_P – потокосцепления фазы А, В и ротора.

$$\Psi_A = L_{AA} \cdot i + L_{AB} \cdot i + L_{AP} \cdot i;$$

$$\Psi_B = L_{BB} \cdot i + L_{AB} \cdot i + L_{BP} \cdot i;$$

$$\Psi_P = L_P \cdot i + L_{AP} \cdot i + L_{BP} \cdot i,$$

где L_{AA}, L_{BB}, L_P – собственные индуктивности фаз А и В и ротора; L_{AP}, L_{BP} – взаимные индуктивности между ротором и фазами; L_{AB} – взаимная индуктивность между обмотками фазы А и В.

При этом взаимные индуктивности равны:

$$L_{AP} = L_M \cdot \cos(\alpha);$$

$$L_{BP} = L_M \cdot \cos(\alpha + 60^\circ),$$

где L_M – максимум взаимных индуктивностей; α – угол поворота вала.

За начальный угол возьмем угол, когда потокосцепления обмоток фазы А статора и ротора направлены в одну сторону.

Из полученных выражений можно вычислить производную тока, а по ней любым численным методом определить и значение самого тока:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_{AB} - 2 \cdot i \cdot (r_1 + r_2) + 2 \cdot L_M \cdot i \cdot n \cdot (\sin(\alpha) + \sin(\alpha + 60^\circ))}{L_{AA} + 2 \cdot L_{AB} + L_{BB} + L_P + 2 \cdot L_M \cdot (\cos(\alpha) + \cos(\alpha + 60^\circ))},$$

где $n = \frac{d\alpha}{dt}$ – скорость вращения вала.

Для вычисления момента воспользуемся уравнением:

$$M = \frac{dW}{d\alpha} = \frac{d}{d\alpha} \left(\sum L_i \cdot i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^3 L_{ij} \cdot i_j^2 \right) = -L_M \cdot i^2 \cdot [\sin(\alpha) + \sin(\alpha + 60^\circ)].$$

Наконец, запишем уравнения движения вала ротора:

$$n = \int \frac{M - Mc}{J} dt;$$

$$\alpha = \int n dt,$$

где Mc – статический момент; J – момент инерции.

Результаты расчета. Расчет проводился для двигателя МТФ111-6 ($P_H = 3.5$ кВт; $U_H = 380$ В; $I_{1H} = 10.4$ А; $M_H = 40$ Нм; $n_H = 895$ об/мин; $I_{2H} = 15$ А; $\eta = 70\%$; $J = 0.05$ кг·м²) который имеет следующие параметры электрической схемы: $L_{AA} = L_{BB} = L_{CC} = 0.116$ Гн, $L_p = 0.027$ Гн, $L_M = 0.098$ Гн, $f = 50$ Гц – частота сети, $L_{AB} = L_{AC} = L_{CB} = -0.045$ Гн, $M_C = 0$, $J = 1$ кг·м², $r_1 = 2.1$ Ом, $r_2 = 0.6$ Ом.

За прототип были приняты естественная механическая и электромеханическая характеристики электропривода (кривые 1 на рис. 3 а, б).

с постоянным моментом статической нагрузки, близким к номинальному моменту (кривые 3), это отношение остается близким к единице. При малых нагрузках относительное значение тока возрастает, т.к. относительно большая доля приходится на намагничивающую составляющую. Так, при $M_C = 0.1$ величина тока статора увеличивается до 0.6...0.7 от номинального значения. Наоборот, в зоне пониженных скоростей электропривод способен развивать момент, больше критического. При этом приращение моментов опережает прираще-

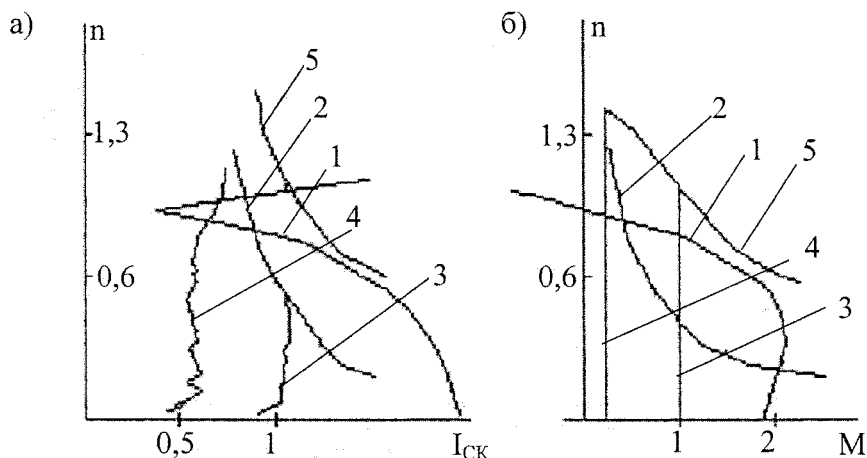


Рис. 3. Электромеханические (а) и механические (б) характеристики

Для удобства расчета все величины на рис. 3 представлены в относительных единицах: за базовое значение скорости принята синхронная скорость двигателя, за базовое значение тока статора – их номинальные значения.

Предельные механическая и электромеханическая характеристики при импульсном регулировании соответствует максимально возможным импульсам напряжения, подаваемым на статор (кривые 2 на рис. 3 а, б). Величины предельных тока и момента снижаются по мере увеличения скорости из-за влияния ЭДС вращения двигателя. Возможен разгон двигателя до скорости выше синхронной, правда, при этом существенно снижается величина момента, развиваемого электродвигателем. Обращает на себя внимание малая величина отношения тока статора к моменту (при номинальном моменте это отношение $I_1/M \approx 1.1$), что следует объяснить близкой к ортогональной взаимной пространственной ориентации векторов МДС обмоток статора и ротора в схеме импульсного регулирования. При регулировании скорости

ние токов статора: например, при $M = 2.5$ наблюдаем $I \approx 1.5$. В районе средних скоростей кривые 2 располагаются ниже, чем 1. Это следовало предвидеть: к сети 380 В подключаются две последовательно соединенные обмотки вместо одной, как в естественной схеме. Характеристики 2 поднимаются вверх, если статорные цепи двигателя вместо $U_C = 380$ В подключить к сети 660 В (кривые 5).

Заключение. Несмотря на импульсный характер регулирования, необходимо отметить хорошие энергетические характеристики электропривода, о чем свидетельствуют малые величины отношения I/M . Наибольшую выгоду следует ожидать в электроприводе механизмов с тяжелыми условиями пуска и малыми затратами на обслуживание. В качестве примера можно указать на электропривод ленточных транспортеров, у которых в зимнее время резко увеличивается момент трогания, а часто требуется прокрутка механизма на пониженной скорости, чтобы предотвратить смерзание смазки в подшипниках рабочего механизма.

Усынин Юрий Семёнович в 1959 г. окончил Челябинский политехнический институт, в 1964 г. – очную аспирантуру при кафедре электропривода Московского энергетического института. Профессиональные интересы: металлургический, общепромышленный, автономный, следящий электроприводы. Доктор технических наук, профессор. Работает на кафедре электропривода ЮУрГУ.

Валов Артем Владимирович – студент 5 курса Южно-Уральского государственного университета.

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ГИСТЕРЕЗИСА С ВИХРЕВЫМИ ТОКАМИ

С.П. Лохов, А.П. Сивкова
г. Челябинск, ЮУрГУ

Показано, что исходная форма [1] модели гистерезиса ученых из Нижнего Новгорода может быть расширена еще двумя [2], [3], а решение их представляет собой задачу следящего управления [4], если бы аргументом стало время. Больше возможностей предоставляет замена линейных дифференциальных уравнений на нелинейные [5]. Экспериментальные петли [2] полезно иметь в памяти ЭВМ, например, в виде сплайнов из эллипсов и гипербол [3]. Для моделирования динамических петель используется известная возможность моделирования вихревых токов включением параллельно активного сопротивления [4]. Предложена схема (рис. 4) исследования стальной с простым разделением разных явлений, на которой еще в 1972 году обнаружена практическая независимость статической петли от частот [5]. Несовпадение динамических петель объяснено вытеснением магнитного поля даже в тонких листах стали и разными статическими петлями в слоях. Предложена малослойная модель магнитопровода, давшая хорошее совпадение с экспериментом.

В современных пакетах прикладного моделирования применяется разработанная в 1986 году модель ферромагнитного гистерезиса Джилса-Атертона [1], которая не только неудобна, но и уступает гораздо ранее разработанным в СССР, хотя не общепризнанным даже на родине моделям. Приоритет принадлежит ученым из Нижнего Новгорода: Ю.А. Савиновскому (неутвержденная докторская диссертация 1974 г.), В.С. Нерсесяну, В.В. Александрову (кандидатская диссертация 1985 г.) и их ученикам. Публикации плохо доступны. Они обратили внимание, что по координате напряженности h петля статического частного цикла перемагничивания приближается к некоей предельной $h_s(b)$ восходящей h_{sv} и нисходящей h_{sn} кривым почти по экспоненте. Это расстояние назовем ошибкой приближения со знаком h_o , тогда процессы в ННМГ описываются двумя уравнениями: линейным дифференциальным и алгебраическим

$$dh_o/db = -A_g \cdot h_o, \quad (1a)$$

$$h = h_s(b) - h_o. \quad (1)$$

Здесь A_g – первый коэффициент магнитных свойств, который так и хочется сравнить с постоянной времени апериодического звена, но здесь аргументом является не время, а индукция, по b и интегрируют уравнение (1a). Не меняя сути, будем излагать и развивать предложение терминами автоматчиков по следящим системам, но используем сокращение ННМГ – «Нижне Новгородская модель гистерезиса». Удобно избавиться от промежуточной координаты h_o

$$dh/db = dh_s(b)/db + A_g \cdot [h_s(b) - h]. \quad (2)$$

«слежения координаты $h(b)$ за заданием $h_s(b)$ ». Можно еще упростить это уравнение

$$dh/db = A_g \cdot [h_s(b) - h], \quad (3)$$

что внешне более похоже на написанное Ю.А. Савиновским, хотя суть его предложений соответствует формулам (1). При изменениях направления перемагничивания во всех уравнениях переключаются функции заданий, скачком меняется величина и знак h_o , при $dh/db = 0$ и при отсутствии скачков индукции и напряженности, что соответствует непрерывности и гладкости петли перемагничивания. Решения уравнений (1)–(3) будут разными, но при постоянных заданиях одинаковыми экспонентами, с чего началась ННМГ.

Модель Джилса-Атертона в ее исходных формулах с номерами (3), (4) [1] использует ту же идею следящего управления, но меняет местами функцию и аргумент. Формула начинается с производной намагниченности dM/dh , интегрирование уравнения производится по h , затем вычисляется b . Этот переворот настолько усложняет применение модели, что мы пока не стали ее сравнивать. У нас также есть сомнения в изначальной «физической обусловленности» зарубежного подхода, что постоянно подчеркивают его авторы. В конечном итоге в моделях «черного ящика» побеждает не физичность, а простота, удобство применения, минимальное число параметров. Остается только подобрать нелинейное уравнение задания и коэффициенты. Для подбора удобно иметь в памяти ЭВМ семейство реальных петель гистерезиса (рис. 1), что проще осуществить сплайнами.

Полиномиальные сплайны не подходят для петли гистерезиса из-за участков с бесконечными производными. Поэтому мы разработали сплайны второго порядка с отрезками гипербол и эллипсов, когда упомянутые участки аппроксимируются

корнем квадратным [3]. При этом гипербола – единственная кривая второго порядка, имеющая асимптоту, что навсегда снимает вопрос об области существования участков насыщения.

Далее начинается подбор функций и параметров без их физического обоснования, поэтому возможны и другие предложения. Для функций задания выбраны формулы

$$h_{3б} = +[H_c + A_m \cdot (D \cdot e^{Ag^b} + E \cdot e^{-XAg^b} - D - E)]; \quad (4a)$$

$$h_{3н} = -[H_c + A_m \cdot (E \cdot e^{XAg^b} + D \cdot e^{-Ag^b} - D - E)]; \quad (4б)$$

которые не выходят за пределы предложений Ю.А. Савиновского. При весовых коэффициентах $D = 0,5; E = -0,5; X=1$ получается чаще всего используемая им формула гиперболического синуса. Хорошие результаты получены при следующих значениях: $D=0,95; E=0,05; H_c=9$ А/м; $A_g=3,22$ 1/Тл, $A_m=0,50$ А/м, $X=1$. На рис. 2 две линии заданий охватывают петлю, пересекая ось в точках $\pm H_c$. Эти точки перестали быть коэрцитивной силой для петель.

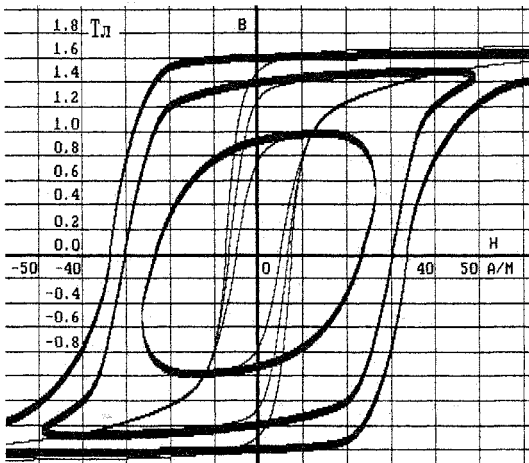


Рис. 1. Статическая (тонкая) и динамическая (толстая) петли гистерезиса стали М6 из [2]

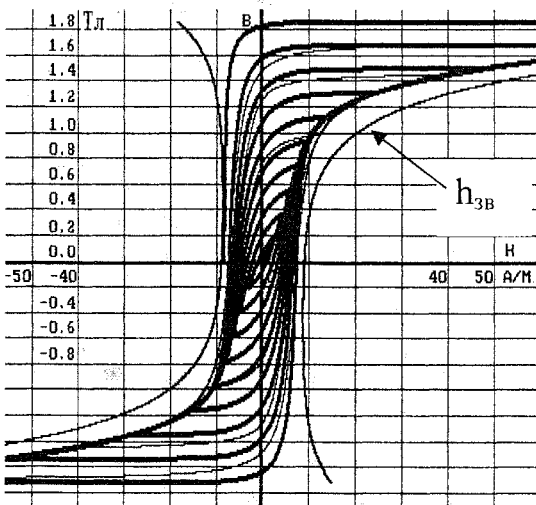


Рис. 2. Статическая петля гистерезиса (4), (5а). Тонкие линии – эксперимент с рис. 1

Из рисунков видим, что ошибка слежения затухает сначала очень быстро, потом резко медленнее, явно не пропорционально ошибке как в (1)–(3). Было решено не выходить на рамки идей ННМГ и использовать экспоненциальные зависимости. Для восходящей ветви пока ограничимся формулой (5а), это развитие формулы (3). Хорошие результаты совпадения на рис. 2 достигнуты при $A_c=5, A/(Тл \cdot м), H_m=4,55$ А/м.

$$dh/db = A_c \cdot \text{sh}[(h_{3б} - h)/H_m] + \quad (5a)$$

$$+ A_m A_g \cdot (D \cdot e^{Ag^b} - E \cdot e^{-Ag^b}). \quad (5б)$$

Интересно наблюдать, как ошибка слежения сначала уменьшается, затем увеличивается, когда кривая задания резко заворачивает. При «экзотических петлях» с выбросами влево во втором и вправо в четвертом квадрантах петли даже пересекают задания. Такое поведение петель (3), (5а) усложняет умозрительный подбор параметров модели. Поэтому интересен вариант «зажатия» петли между восходящей и нисходящей ветвями задания, что получается в формулах (1), (2), (5) – с добавкой (5б). Выбор варианта пока остается делом вкуса пользователя, но для каждого варианта будут свои параметры.

Неожиданной проблемой модели без ограничений оказались переполнения формата при больших значениях аргумента экспоненты. Частично снимает эту проблему спрямление экспоненты при больших значениях прямой со сплайновой стыковкой. По крайней мере, эквивалентная магнитная проницаемость не должна быть меньше, чем у вакуума. Возможно более раннее спрямление параболой и т.д.

Динамические петли гистерезиса для справочников снимают при разных частотах синусоидального изменения индукции или напряженности, что не одно и то же. Автоматчики тоже исследуют динамические системы по реакции на синусоидальное возмущение, но любят тестировать и скачками. По множеству семейств петель надо составить одну всеохватывающую модель. Здесь нужны конструктивные идеи. Примером неконструктивного подхода является [1], где вышеописанные действия применяют к динамической петле на частоте 40 кГц.

Учебники ТОЭ рекомендуют разделить модели процессов на две независимые и учитывать потери на вихревые токи включением линейного активного сопротивления параллельно нелинейной индуктивности [4]. Последовательное включение сопротивления не отражает физику явления в переходных режимах, однако часто применяется только потому, что на определенной частоте имеют одинаковую амплитуду и фазу частотной характеристики. На других частотах характеристики расходятся. Тогда схема замещения трансформатора с нелинейным «однослойным» (см. ниже) магнитопроводом должна иметь вид рис. 3 пока без звена $L_{m2}, G_{г2}$.

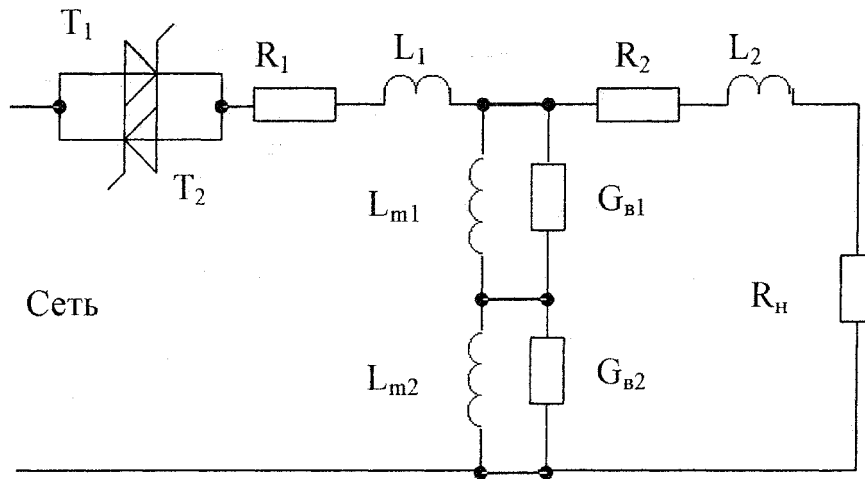


Рис. 3. Схема замещения трансформатора с двухслойным магнитопроводом и несинусоидальным источником питания

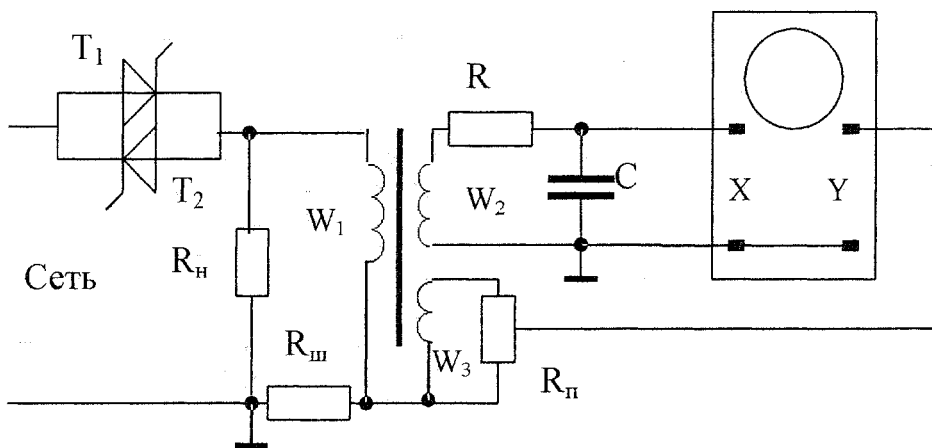


Рис. 4. Схема получения на экране осциллографе петли гистерезиса без вихревых токов

Здесь сопротивление потерь обозначено его проводимостью G_v вихревых потерь. Видим, что ток вихревых потерь при такой схеме замещения по закону Ома пропорционален ЭДС самоиндукции обмоток на магнитопроводе. Значит можно намотать измерительную обмотку W_3 , напряжение на ней будет пропорционально вихревым токам так же, как интеграл этой ЭДС, измеренный обмоткой W_2 , будет пропорционален индукции в магнитопроводе (рис. 4) [5].

Для интегрирования в этой известной схеме используется RC-цепочка с большой постоянной времени, а новыми элементами является еще одна измерительная обмотка и потенциометр R_n с таким большим сопротивлением, чтобы его собственное потребление не влияло на процесс измерения. Коэффициент деления потенциометра подбирается таким, чтобы точно скомпенсировать вихревую составляющую в сигнале тока обмотки $i_{обм}$ с шунта $R_{ш}$. Нагрузка R_n вынесена за пределы измеряемой части схемы, но в сумме с током обмотки трансформатора она создает первичный ток сети i_1 (показан уменьшенным на рис. 5).

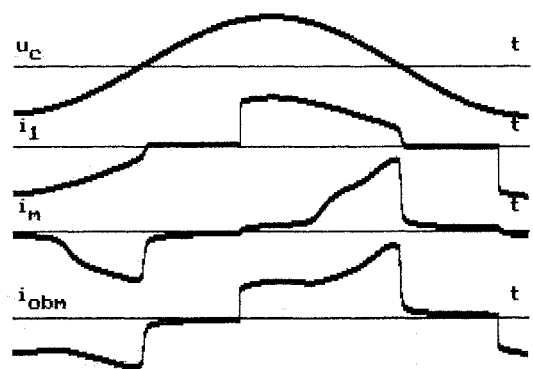


Рис. 5. Напряжение и токи сети, трансформатора с компенсацией вихревых токов и без нее

Коэффициент деления R_n определяется очень просто: при питании схемы напряжением со скачками, например, при наличии тиристоров (рис. 4). Этот коэффициент изменяется до тех пор, пока в сигнале i_n на экране осциллографа не исчезнет скачок, что легко фиксируется глазом.

Этот скачок фиксируется также на фазовой траектории, т.е. на петле гистерезиса (рис. 1), что показано на фотографиях в Приложении к диссертации [5], надо еще научиться отражать подобное на экранах мониторов. Как сложно выделяют составляющую вихревых потерь при традиционных методиках, написано в [2].

Исследования с помощью схемы (рис. 4) трансформаторной стали обнаружили факт **независимости статической петли гистерезиса от частоты**. Скачок (а это набор бесконечных частот) проявлял себя только на динамической петле, т.е. на показанной толстыми линиями петле на рис. 1, и не давал мельчайшего отклонения от показанной тонкими линиями статической петли, что противоречит взглядам специалистов по магнитным материалам. Не замечено и изменений формы петли при изменениях частоты синусоиды без скачков в диапазоне 30–300 Гц [5]. Надо отметить, что опыты в схеме рис. 5 могут дать погрешность измерений до 10 % абсолютного значения измеряемой величины, но факт отсутствия дифференциальных отклонений глаз фиксирует точно! Нас же этот факт устраивает приятной возможностью разделения процессов на нелинейные статические и линейные динамические. Обидно, что такое простое открытие написано еще в учебниках ТОЭ, но в солидных научных публикациях об этом забывают. Поэтому **схему на рис. 4 целесообразно принять за эталон для исследования сталей**.

Подобрать параллельную проводимость вихревых токов к статической модели (рис. 2) такой, чтобы получить динамическую модель на рис. 1 не удалось. Наилучшее приближение показано на

рис. 6 тонкой линией. Прежде всего, не устраивает качественное несовпадение в первом и третьем квадрантах, где появились участки впадин.

Принята гипотеза, что даже в тонких листах стали **существенную роль играет явление вытеснение магнитного поля**. Тогда нужна идея упрощенного решения этой сложной задачи с распределенными параметрами. Очевидна возможность замены однослойного магнитопровода многослойным, дальнейшие предложения могут быть подвергнуты критике. Мы опираемся на результаты решения задачи проникновения магнитного и теплового поля внутрь среды А.В. Нетушилом. Им показано, что в совокупности подобные объекты с распределенными параметрами имеют **частотную характеристику «полунинерционного звена»**, наклон которой составляет половину децилога на декаду. Далее принято допущение, что **многослойной магнитной системе соответствует электрическая схема замещения рис. 3**, звенья которой подобраны так, чтобы дали кусочно-ступенчатую аппроксимацию половинного наклона частотной характеристики. Это приблизительно получается, когда индуктивности и параллельные им проводимости (рис. 3) изменяются по закону геометрической прогрессии с коэффициентом K . При одинаковом числе витков индуктивности пропорциональны сечению магнитопровода. Тогда по закону этой прогрессии и поделим слои магнитопровода при заданном числе слоев и их сумме. При этом величина коэффициента и число слоев не влияют на наклон частотной характеристики всей цепи, а определяют только диапазон частот с половинным наклоном. Принято, что общее со-

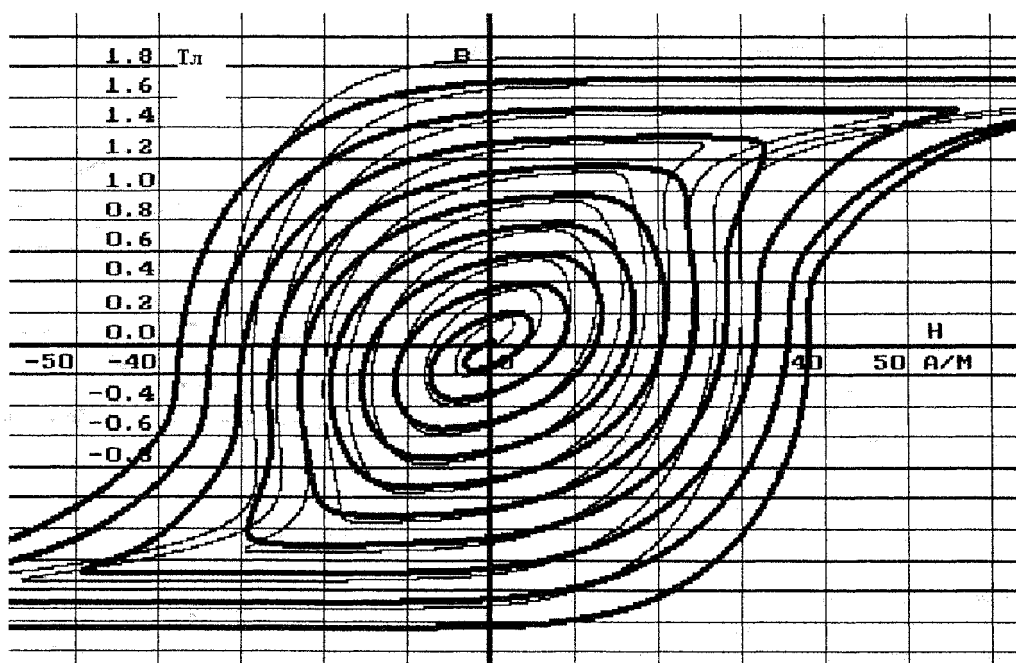


Рис. 6. Модель динамической петли гистерезиса при однослойном (тонкая линия) и четырехслойном (толстая) магнитопроводе

противление цепочки из любого числа проводимостей должно оставаться неизменным. Вывод простых формул при описанных условиях опускаем, их программирование на ЭВМ не составляет труда. Пример решения для 4-слойного случая с $K = 1,1$ приведен на рис. 6. Сравнение с рис. 1 показывает хорошее качественное совпадение характеристик в 1-м и 3-м квадрантах и плохое в остальных. Выдвинута гипотеза, что резкий угол в этих квадрантах объясняется вышеупомянутой «экзотической статической» характеристикой всей стали при более значительных, чем на рис. 1 индукциях, или только отдельных ее слоев. Эксперимент доказал допустимость такой гипотезы, когда было получено хорошее совпадение модели с экспериментом во всех квадрантах.

Литература

1. Новиков, А.А. Экспериментальное исследование параметров модели перемагничивания ферромагнетиков Джилса–Атертона / А.А. Новиков, С.А. Амелин // *Электричество*. – 1995. – № 9 – С. 46–51.
2. Дружинин, В.В. Магнитные свойства электротехнической стали / В.В. Дружинин. – Москва: Энергия, 1974. – 240 с.
3. Лохов, С.П. Сплайны конических сечений и петля гистерезиса / С.П. Лохов, А.П. Сивкова // *XI Международная конференция: Электромеханика, электротехнология, электротехнические материалы и компоненты: сб. науч. тр.* – Крым, Алушта, 2006. – С. 295–296.
4. Теоретические основы электротехники. Часть II–III / Г.И. Атабеков, С.Д. Купалян, А.Б. Тимофеев и др. – Москва–Ленинград: Энергия, 1966.
5. Лохов, С.П. Разработка и исследование тиристорных регуляторов мощности нагревательных установок: дис. ...канд. техн. наук / С.П. Лохов. – Челябинск: ЧПИ, 1972. – 182 с.

Лохов Сергей Прокопьевич, 1945 г.р. – доктор техн. наук, профессор кафедры Электропривода ЮУрГУ

Сивкова Анна Прокопьевна, 1959 г.р. – ассистент той же кафедры.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОВОДИМОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ДЛЯ ЛИНИИ С ОТПАЙКОЙ

Ш.Н. Хусаинов, Р.Р. Нараева
г. Челябинск, ЮУрГУ

Предложен выбор схемы замещения линии с изолированной нейтралью, имеющей одну отпайку, по анализу погрешности результатов расчета параметров изоляции, и проанализированы результаты расчета для случая ухудшения изоляции на одном из участков сети одной из фаз.

В данной работе определение параметров изоляции и места повреждения участка сети, имеющей одну отпайку, проводится в два этапа. На первом этапе выбирается схема замещения линии с отпайкой по анализу погрешностей результатов расчета параметров изоляции. Расчеты проводятся по методу узловых потенциалов (МУП) и методу контурных токов (МКТ). На втором этапе анализ выполняется для случая ухудшения изоляции на одном из участков сети.

Рассмотрим первый этап расчетов, в котором анализируется два варианта схемы замещения линии с отпайкой: П-образная и Т-образная, рассчитанные по методу узловых потенциалов и методу контурных токов.

При этом считается заданной трёхфазная цепь с симметричным источником ЭДС и симметричной нагрузкой, поэтому расчёты выполняются для схемы фазы А. Для сопоставления результатов расчета и погрешностей определения параметров изоляции по МКТ и МУП использована цифровая модель линии с отпайкой с П-образной и Т-образной схемами замещения, записанная в пакете MathCAD. При решении задачи цифрового моделирования, как и в работе [1] заданными считаем следующие параметры:

- 1) продольное комплексное сопротивление \underline{Z} главной линии;
- 2) продольное комплексное сопротивление \underline{Z}_3 отпаечной линии;
- 3) длина главной линии l и отпаечной линии l_3 ;
- 4) относительная длина k первого (головного) участка главной линии; (главная линия длиной l делится местом присоединения отпайки на две части; соответственно сопротивление первого участка линии $\underline{Z}_1 = k \cdot \underline{Z}$ и сопротивление второго участка $\underline{Z}_2 = (1 - k) \cdot \underline{Z}$);
- 5) коэффициент распределения проводимости m ; (аналогично проводимость первого участка линии

$$\underline{Y}_1 = m \cdot \underline{Y} \text{ и проводимость второго участка линии } \underline{Y}_2 = (1 - m) \cdot \underline{Y};$$

6) напряжение в точке присоединения отпайки U_0 ;

7) нагрузка в конце главной и отпаечной линий \underline{Z}_{a2} и \underline{Z}_{a3} соответственно.

Схемы замещения фазы участка сети цифровой модели представлены на рис. 1 (для П-образной) и на рис. 2 (для Т-образной). Расчеты выполняются по участкам сети, начиная со второго участка.

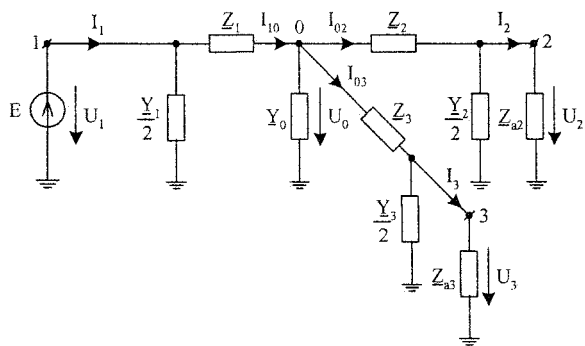


Рис. 1. П-образная схема замещения фазы участка сети

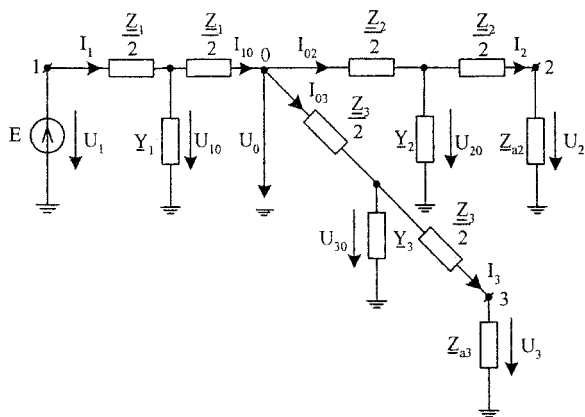


Рис. 2. Т-образная схема замещения фазы участка сети

Для П-образной схемы цифровой модели (рис. 1) определяем:

- сопротивления в конце второго участка вместе с проводимостью изоляции (Z_{12}) и в месте присоединения отпайки (Z_{02})

$$Z_{12} = \frac{2 \cdot Z_{a2}}{Z_{a2} \cdot Y_2 + 2}; \quad Z_{02} = Z_2 + Z_{12};$$

- ток на втором участке от места присоединения отпайки (по закону Ома)

$$i_{02} = \frac{U_0}{Z_{02}};$$

- напряжение в конце второго участка

$$U_2 = I_{02} \cdot Z_{12};$$

- ток в конце второго участка

$$i_2 = \frac{U_2}{Z_{a2}}.$$

Аналогично выполняются расчеты для третьего участка сети с заменой индекса 2 на 3.

Для головного участка сети определяем:

- проводимость в месте присоединения отпайки

$$Y_0 = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3}{2};$$

- ток через Y_0 в месте присоединения отпайки

$$i_0 = U_0 \cdot Y_0;$$

- ток на первом участке от места присоединения отпайки (по I закону Кирхгофа)

$$i_{10} = i_{02} + i_{03} + i_0;$$

- напряжение в начале основной линии

$$U_1 = i_{10} \cdot Z_1 + U_0;$$

- ток в начале основной линии

$$I_1 = i_{10} + U_1 \cdot \frac{Y_1}{2}.$$

Для Т-образной схемы цифровой модели (рис. 2) определяем:

- сопротивления на последовательном Z_{12} , параллельном Z_{22} участках цепи и в месте присоединения отпайки Z_{02}

$$Z_{12} = \frac{Z_2}{2} + Z_{a2};$$

$$Z_{22} = \frac{Z_{12}}{Z_{12} \cdot Y_2 + 1};$$

$$Z_{02} = \frac{Z_2}{2} + Z_{22};$$

- ток на втором участке от места присоединения отпайки (по закону Ома)

$$i_{02} = \frac{U_0}{Z_{02}};$$

- ток в конце второго участка

$$i_2 = i_{02} \cdot \frac{Z_{22}}{Z_{12}};$$

- напряжение в конце второго участка

$$U_2 = i_2 \cdot Z_{a2}.$$

Аналогичные расчеты для третьего участка сети с заменой индекса 2 на 3.

Для головного участка сети определяем:

- ток на первом участке от места присоединения отпайки (по I закону Кирхгофа)

$$i_{10} = i_{02} + i_{03};$$

- ток в начале основной линии

$$I_1 = i_{10} + (i_{10} \cdot \frac{Z_1}{2} + U_0) \cdot Y_1;$$

- напряжение в начале основной линии

$$U_1 = I_1 \cdot \frac{Z_1}{2} + i_{10} \cdot \frac{Z_1}{2} + U_0.$$

Действительные значения измеряемых величин, полученные в цифровых моделях П-образной и Т-образной схем замещения, используются при моделировании измерений напряжений и токов приборами класса 0,1 для 100 циклов измерений. Расчеты выполняются по методу узловых потенциалов и методу контурных токов для обоих вариантов схем замещения: П-образной (рис. 3 (МУП); рис. 4 (МКТ)) и Т-образной (рис. 5 (МУП); рис. 6 (МКТ)).

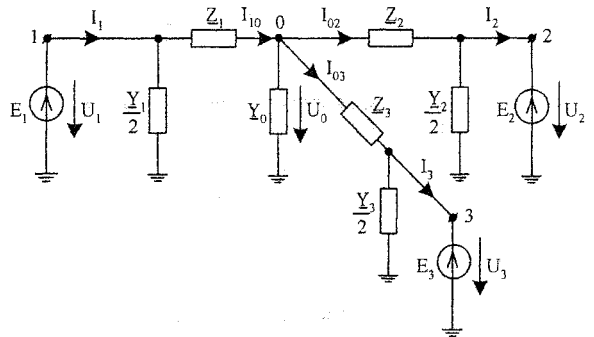


Рис. 3. П-образная схема замещения участка сети для расчета по МУП

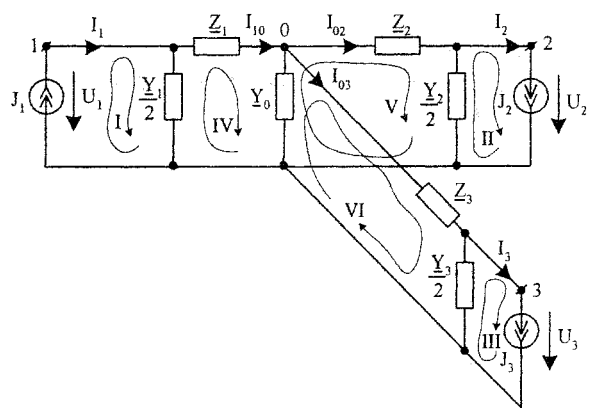


Рис. 4. П-образная схема замещения участка сети для расчета по МКТ

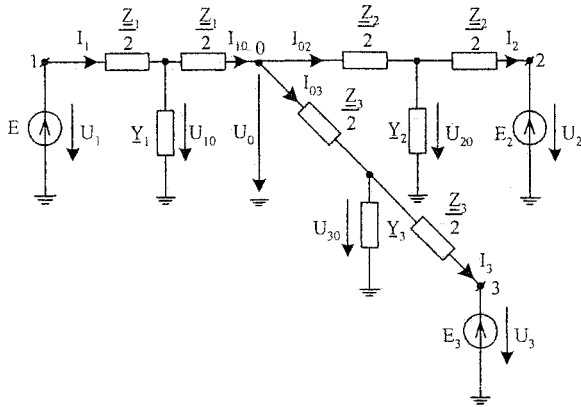


Рис. 5. Т-образная схема замещения фазы участка сети для расчета по МУП

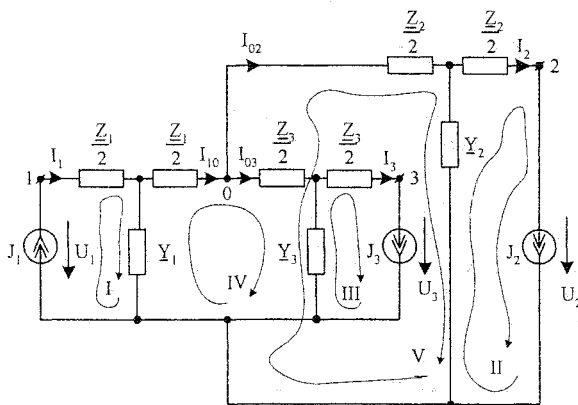


Рис. 6. Т-образная схема замещения фазы участка сети для расчета по МКТ

В расчетах принимаем $U_1 = U_1$;
 $U_2 = U_2 \cdot e^{j \operatorname{Re}(\psi)}$; $U_3 = U_3 \cdot e^{j \operatorname{Im}(\psi)}$, где
 $\psi = \psi_2 + j\psi_3$.

Так же, как и в работе [2] вводятся обозначения: $I_1 = I_1 \cdot e^{-j\varphi_1}$; $I_2 = I_2 \cdot e^{-j\varphi_2}$; $I_3 = I_3 \cdot e^{-j\varphi_3}$.

Для первого варианта расчетов П-образной схемы замещения по МУП (рис. 3) данными цифровой модели являются:

$$\underline{Y}, \underline{Y}_3, m, U_0 = U_0 \cdot e^{j\psi_0}, \psi = \psi_2 + j\psi_3.$$

Запишем уравнения по методу узловых потенциалов:

$$\varphi_1 = \dot{U}_1;$$

$$\varphi_2 = U_2,$$

$$\varphi_3 = \dot{U}_3,$$

$$\varphi_0 \cdot Y_{00} - \varphi_1 \cdot Y_{01} - \varphi_2 \cdot Y_{02} - \varphi_3 \cdot Y_{03} = 0,$$

где $Y_{01} = \frac{1}{Z_1}$; $Y_{02} = \frac{1}{Z_2}$; $Y_{03} = \frac{1}{Z_3}$;

$$Y_{00} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + Y_0, \text{ здесь } Y_0 = \frac{Y_1}{2} + \frac{Y_2}{2} + \frac{Y_3}{2}$$

С учетом коэффициента проводимости m и замены $\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} = g$ получим $Y_{00} = g + \frac{Y + Y_3}{2}$.

С учетом приведенных выше обозначений и, выразив токи через разность потенциалов по закону Ома, после преобразования получим уравнения:

$$\dot{U}_0 \cdot \left(g + \frac{Y + Y_3}{2}\right) - U_1 \cdot \frac{1}{Z_1} - U_2 \cdot e^{j \operatorname{Re}(\psi)} \cdot \frac{1}{Z_2} -$$

$$- U_3 \cdot e^{j \operatorname{Im}(\psi)} \cdot \frac{1}{Z_3} = 0;$$

$$\frac{U_1 - U_0}{Z_1} + U_1 \cdot \frac{m \cdot Y}{2} - \dot{I}_1 = 0;$$

$$\frac{U_2 \cdot e^{j \operatorname{Re}(\psi)} - U_0}{Z_2} + U_2 \cdot e^{j \operatorname{Re}(\psi)} \cdot (1 - m) \cdot \frac{Y}{2} +$$

$$+ \dot{I}_2 \cdot e^{j \operatorname{Re}(\psi)} = 0;$$

$$\frac{U_3 \cdot e^{j \operatorname{Im}(\psi)} - U_0}{Z_3} + U_3 \cdot e^{j \operatorname{Im}(\psi)} \cdot \frac{Y_3}{2} + \dot{I}_3 \cdot e^{j \operatorname{Im}(\psi)} = 0$$

и выполним расчет данных уравнений в пакете MathCad.

Для расчета П-образной схемы замещения по МКТ (рис. 4) данными цифровой модели являются: \underline{Y} , \underline{Y}_3 , m , $\dot{I}_{10} = I_{10} \cdot e^{j\psi_{10}}$, $\dot{I}_{02} = I_{02} \cdot e^{j\psi_{102}}$,

$$\dot{I}_{03} = I_{03} \cdot e^{j\psi_{103}}, \psi = \psi_2 + j\psi_3.$$

Запишем уравнения по методу контурных токов:

$$I_{11} = I_1;$$

$$I_{22} = I_2;$$

$$I_{33} = I_3,$$

$$I_{11} \cdot Z_{41} + I_{22} \cdot Z_{42} + I_{33} \cdot Z_{43} + \dot{I}_{44} \cdot Z_{44} +$$

$$+ I_{55} \cdot Z_{45} + \dot{I}_{66} \cdot Z_{46} = E_{44};$$

$$\dot{I}_{11} \cdot Z_{51} + I_{22} \cdot Z_{52} + \dot{I}_{33} \cdot Z_{53} + I_{44} \cdot Z_{54} +$$

$$+ I_{55} \cdot Z_{55} + I_{66} \cdot Z_{56} = \dot{E}_{55},$$

$$\dot{I}_{11} \cdot Z_{61} + \dot{I}_{22} \cdot Z_{62} + \dot{I}_{33} \cdot Z_{63} + \dot{I}_{44} \cdot Z_{64} +$$

$$+ I_{55} \cdot Z_{65} + \dot{I}_{66} \cdot Z_{66} = \dot{E}_{66},$$

где $Z_{41} = -\frac{2}{Y_1} = -\frac{2}{m \cdot Y}$, $Z_{42} = 0$; $Z_{43} = 0$,

$$Z_{44} = \frac{2}{Y_1} + Z_1 + \frac{1}{Y_0} = Z_1 + \frac{2}{m \cdot Y} + \frac{2}{Y + Y_3}, \text{ здесь}$$

$$Y_0 = \frac{Y_1}{2} + \frac{Y_2}{2} + \frac{Y_3}{2} = \frac{Y + Y_3}{2};$$

$$Z_{45} = Z_{54} = -\frac{1}{Y_0} = -\frac{2}{Y + Y_3};$$

$$Z_{46} = Z_{64} = -\frac{1}{Y_0} = -\frac{2}{Y + Y_3}; Z_{51} = 0;$$

$$Z_{52} = -\frac{2}{Y_2} = -\frac{2}{Y - m \cdot Y}; Z_{53} = 0;$$

$$\underline{Z}_{55} = \underline{Z}_2 + \frac{2}{\underline{Y}_2} + \frac{1}{\underline{Y}_0} = \underline{Z}_2 + \frac{2}{\underline{Y} - m \cdot \underline{Y}} + \frac{2}{\underline{Y} + \underline{Y}_3};$$

$$\underline{Z}_{56} = \underline{Z}_{65} = \frac{1}{\underline{Y}_0} = \frac{2}{\underline{Y} + \underline{Y}_3}; \quad \underline{Z}_{61} = 0; \quad \underline{Z}_{62} = 0;$$

$$\underline{Z}_{63} = -\frac{2}{\underline{Y}_3}; \quad \underline{Z}_{66} = \underline{Z}_3 + \frac{2}{\underline{Y}_3} + \frac{1}{\underline{Y}_0} = \underline{Z}_3 + \frac{2}{\underline{Y}_3} + \frac{2}{\underline{Y} + \underline{Y}_3};$$

$$\dot{E}_{44} = 0; \quad E_{55} = 0; \quad \dot{E}_{66} = 0; \quad \dot{I}_{44} = I_{10}, \quad \dot{I}_{55} = I_{02},$$

$$I_{66} = I_{03}$$

С учетом вышеизложенных обозначений и выражив напряжения $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3$ через контурные токи по закону Ома полученные уравнения преобразуются к виду:

$$-\dot{I}_1 \cdot \frac{2}{m \cdot \underline{Y}} + I_{10} \cdot \left(\underline{Z}_1 + \frac{2}{m \cdot \underline{Y}} + \frac{2}{\underline{Y} + \underline{Y}_3} \right) - I_{02} \cdot \frac{2}{\underline{Y} + \underline{Y}_3} -$$

$$-\dot{I}_{03} \cdot \frac{2}{\underline{Y} + \underline{Y}_3} = 0;$$

$$-I_2 \cdot \ell^{j\text{Re}(\psi)} \cdot \frac{2}{\underline{Y} - m \cdot \underline{Y}} - I_{10} \cdot \frac{2}{\underline{Y} + \underline{Y}_3} +$$

$$+ I_{02} \cdot \left(\underline{Z}_2 + \frac{2}{\underline{Y} - m \cdot \underline{Y}} + \frac{2}{\underline{Y} + \underline{Y}_3} \right) + \dot{I}_{03} \cdot \frac{2}{\underline{Y} + \underline{Y}_3} = 0;$$

$$-\dot{I}_3 \cdot \ell^{j\text{Im}(\psi)} \cdot \frac{2}{\underline{Y}_3} - \dot{I}_{10} \cdot \frac{2}{\underline{Y} + \underline{Y}_3} + I_{02} \cdot \frac{2}{\underline{Y} + \underline{Y}_3} +$$

$$+ \dot{I}_{03} \cdot \left(\underline{Z}_3 + \frac{2}{\underline{Y}_3} + \frac{2}{\underline{Y} + \underline{Y}_3} \right) = 0;$$

$$U_1 - I_1 \cdot \frac{2}{m \cdot \underline{Y}} + \dot{I}_{10} \cdot \frac{2}{m \cdot \underline{Y}} = 0;$$

$$U_2 \cdot \ell^{j\text{Re}(\psi)} + I_2 \cdot \ell^{j\text{Re}(\psi)} \cdot \frac{2}{\underline{Y} - m \cdot \underline{Y}} - I_{02} \cdot \frac{2}{\underline{Y} - m \cdot \underline{Y}} = 0;$$

$$U_3 \cdot \ell^{j\text{Im}(\psi)} + I_3 \cdot \ell^{j\text{Im}(\psi)} \cdot \frac{2}{\underline{Y}_3} - \dot{I}_{03} \cdot \frac{2}{\underline{Y}_3} = 0.$$

Данные уравнения рассчитываем в пакете MathCad.

Для второго варианта расчетов Т-образной схемы замещения по МУП (рис. 5) данными цифровой модели являются:

$$\underline{Y}, \quad \underline{Y}_3, \quad m, \quad U_0 = U_0 \cdot \ell^{j\psi_0}, \quad U_{10} = U_{10} \cdot \ell^{j\psi_{10}},$$

$$U_{02} = U_{02} \cdot \ell^{j\psi_{02}}, \quad U_{03} = U_{03} \cdot \ell^{j\psi_{03}}, \quad \psi = \psi_2 + j\psi_3$$

Запишем уравнения по методу узловых потенциалов:

$$\Phi_0 \cdot \underline{Y}_{00} - \Phi_1 \cdot \underline{Y}_{01} - \Phi_2 \cdot \underline{Y}_{02} - \Phi_3 \cdot \underline{Y}_{03} = J_{00};$$

$$-\Phi_0 \cdot \underline{Y}_{10} + \Phi_1 \cdot \underline{Y}_{11} - \Phi_2 \cdot \underline{Y}_{12} - \Phi_3 \cdot \underline{Y}_{13} = \dot{J}_{11};$$

$$-\Phi_0 \cdot \underline{Y}_{20} - \Phi_1 \cdot \underline{Y}_{21} + \Phi_2 \cdot \underline{Y}_{22} - \Phi_3 \cdot \underline{Y}_{23} = \dot{J}_{33};$$

$$-\Phi_0 \cdot \underline{Y}_{30} - \Phi_1 \cdot \underline{Y}_{31} - \Phi_2 \cdot \underline{Y}_{32} + \Phi_3 \cdot \underline{Y}_{33} = \dot{J}_{33},$$

$$\text{где } \underline{Y}_{00} = \frac{2}{\underline{Z}_1} + \frac{2}{\underline{Z}_2} + \frac{2}{\underline{Z}_3} = g_1; \quad \underline{Y}_{01} = \underline{Y}_{10} = \frac{2}{\underline{Z}_1},$$

$$\underline{Y}_{02} = \underline{Y}_{20} = \frac{2}{\underline{Z}_2}; \quad \underline{Y}_{03} = \underline{Y}_{30} = \frac{2}{\underline{Z}_3};$$

$$\underline{Y}_{11} = \frac{2}{\underline{Z}_1} + \frac{2}{\underline{Z}_1} + \underline{Y}_1 = \frac{4}{\underline{Z}_1} + m \cdot \underline{Y}; \quad \underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21} = 0;$$

$$\underline{Y}_{13} = \underline{Y}_{31} = 0; \quad \underline{Y}_{22} = \frac{2}{\underline{Z}_2} + \frac{2}{\underline{Z}_2} + \underline{Y}_2 = \frac{4}{\underline{Z}_2} + \underline{Y} - m \cdot \underline{Y},$$

$$\underline{Y}_{23} = \underline{Y}_{32} = 0; \quad \underline{Y}_{33} = \frac{2}{\underline{Z}_3} + \frac{2}{\underline{Z}_3} + \underline{Y}_3 = \frac{4}{\underline{Z}_3} + \underline{Y}_3;$$

$$\Phi_0 = U_0; \quad \Phi_1 = U_{10}; \quad \Phi_2 = U_{20}; \quad \Phi_3 = U_{30}; \quad \dot{J}_{00} = 0;$$

$$\dot{J}_{11} = \frac{\dot{E}_1 \cdot 2}{\underline{Z}_1} = \frac{2 \cdot U_1}{\underline{Z}_1}, \quad \dot{J}_{22} = \frac{E_2 \cdot 2}{\underline{Z}_2} = \frac{2 \cdot U_2 \cdot \ell^{j\text{Re}(\psi)}}{\underline{Z}_2};$$

$$\dot{J}_{33} = \frac{\dot{E}_3 \cdot 2}{\underline{Z}_3} = \frac{2 \cdot U_3 \cdot \ell^{j\text{Im}(\psi)}}{\underline{Z}_3}.$$

С учетом приведенных выше обозначений и, выразив токи через разность потенциалов по закону Ома, после преобразования получим уравнения:

$$\dot{U}_0 \cdot g_1 - \dot{U}_{10} \cdot \frac{2}{\underline{Z}_1} - U_{20} \cdot \frac{2}{\underline{Z}_2} - U_{30} \cdot \frac{2}{\underline{Z}_3} = 0;$$

$$-\dot{U}_0 \cdot \frac{2}{\underline{Z}_1} + U_{10} \cdot \left(\frac{4}{\underline{Z}_1} + m \cdot \underline{Y} \right) - U_1 \cdot \frac{2}{\underline{Z}_1} = 0;$$

$$-\dot{U}_0 \cdot \frac{2}{\underline{Z}_2} + U_{20} \cdot \left(\frac{4}{\underline{Z}_2} + \underline{Y} - m \cdot \underline{Y} \right) - U_2 \cdot \ell^{j\text{Re}(\psi)} \cdot \frac{2}{\underline{Z}_2} = 0;$$

$$-\dot{U}_0 \cdot \frac{2}{\underline{Z}_3} + U_{30} \cdot \left(\frac{4}{\underline{Z}_3} + \underline{Y}_3 \right) - U_3 \cdot \ell^{j\text{Im}(\psi)} \cdot \frac{2}{\underline{Z}_3} = 0;$$

$$\dot{I}_1 + \dot{U}_0 \cdot \frac{2}{\underline{Z}_1} + U_{10} \cdot \frac{2}{\underline{Z}_1} - U_{10} \cdot m \cdot \underline{Y} = 0;$$

$$\dot{I}_2 \cdot \ell^{j\text{Re}(\psi)} - U_0 \cdot \frac{2}{\underline{Z}_2} + \dot{U}_{20} \cdot \frac{2}{\underline{Z}_2} + \dot{U}_{20} \cdot \underline{Y} - \dot{U}_{20} \cdot m \cdot \underline{Y} = 0;$$

$$I_3 \cdot \ell^{j\text{Im}(\psi)} - U_0 \cdot \frac{2}{\underline{Z}_3} + U_{30} \cdot \frac{2}{\underline{Z}_3} + \dot{U}_{30} \cdot \underline{Y}_3 = 0.$$

Расчеты данных уравнений выполним в пакете MathCad.

Для расчета Т-образной схемы методом контурных токов (рис. 6) за исходные данные из цифровой модели примем:

$$\underline{Y}, \quad \underline{Y}_3, \quad m, \quad \dot{I}_{10} = I_{10} \cdot \ell^{j\psi_{10}}, \quad I_{02} = I_{02} \cdot \ell^{j\psi_{02}}.$$

Запишем уравнения по методу контурных токов

$$\dot{I}_{11} = \dot{I}_1;$$

$$\dot{I}_{22} = I_2;$$

$$\dot{I}_{33} = \dot{I}_3;$$

$$\dot{I}_{11} \cdot \underline{Z}_{41} + \dot{I}_{22} \cdot \underline{Z}_{42} + \dot{I}_{33} \cdot \underline{Z}_{43} + \dot{I}_{44} \cdot \underline{Z}_{44} +$$

$$+ I_{55} \cdot \underline{Z}_{45} = E_{44};$$

$$\dot{I}_{11} \cdot \underline{Z}_{51} + I_{22} \cdot \underline{Z}_{52} + \dot{I}_{33} \cdot \underline{Z}_{53} + I_{44} \cdot \underline{Z}_{54} +$$

$$+ I_{55} \cdot \underline{Z}_{55} = \dot{E}_{55},$$

$$\text{где } \underline{Z}_{41} = -\frac{1}{\underline{Y}_1} = -\frac{1}{m \cdot \underline{Y}}; \quad \underline{Z}_{42} = 0; \quad \underline{Z}_{43} = -\frac{1}{\underline{Y}_3};$$

$$\underline{Z}_{45} = \underline{Z}_{54} = -\frac{\underline{Z}_3}{2} - \frac{1}{\underline{Y}_3}; \quad \underline{Z}_{51} = 0;$$

$$Z_{44} = \frac{Z_1}{2} + \frac{Z_3}{2} + \frac{1}{Y_1} + \frac{1}{Y_3} = \frac{Z_1}{2} + \frac{Z_3}{2} + \frac{1}{m \cdot Y} + \frac{1}{Y_3};$$

$$Z_{52} = -\frac{1}{Y_2} = -\frac{1}{m \cdot Y - Y}; \quad Z_{53} = \frac{1}{Y_3};$$

$$Z_{55} = \frac{Z_2}{2} + \frac{Z_3}{2} + \frac{1}{Y_2} + \frac{1}{Y_3} = \frac{Z_2}{2} + \frac{Z_3}{2} + \frac{1}{Y - m \cdot Y} + \frac{1}{Y_3};$$

$$\dot{E}_{44} = 0; \quad \dot{E}_{55} = 0; \quad \dot{I}_{44} = \dot{I}_{10}; \quad \dot{I}_{55} = \dot{I}_{02}$$

С учетом приведенных выше обозначений и выражив напряжения U_1, U_2, U_3 через контурные токи по закону Ома полученные уравнения преобразуем к виду:

$$-I_1 \cdot \frac{1}{m \cdot Y} + I_3 \cdot \ell^{j\text{Im}(\psi)} \cdot \frac{1}{Y_3} + I_{10} \cdot \left(\frac{Z_1}{2} + \frac{Z_3}{2} + \frac{1}{m \cdot Y} + \frac{1}{Y_3} \right) -$$

$$-I_{20} \cdot \left(\frac{Z_3}{2} + \frac{1}{Y_3} \right) = 0;$$

$$I_2 \cdot \ell^{j\text{Re}(\psi)} \cdot \frac{1}{m \cdot Y - Y} + I_3 \cdot \ell^{j\text{Im}(\psi)} \cdot \frac{1}{Y_3} - I_{10} \cdot \left(\frac{Z_3}{2} + \frac{1}{Y_3} \right) +$$

$$+ I_{02} \cdot \left(\frac{Z_2}{2} + \frac{Z_3}{2} + \frac{1}{Y - m \cdot Y} + \frac{1}{Y_3} \right) = 0;$$

$$I_1 \cdot \frac{Z_1}{2} + I_1 \cdot \frac{1}{m \cdot Y} - I_{10} \cdot \frac{1}{m \cdot Y} - U_1 = 0;$$

$$I_2 \cdot \ell^{j\text{Re}(\psi)} \cdot \frac{Z_2}{2} - I_{02} \cdot \frac{1}{Y - m \cdot Y} + I_2 \cdot \ell^{j\text{Re}(\psi)} \cdot \frac{1}{Y - m \cdot Y} +$$

$$+ U_2 \cdot \ell^{j\text{Re}(\psi)} = 0;$$

$$I_3 \cdot \ell^{j\text{Im}(\psi)} \cdot \frac{Z_3}{2} - I_{10} \cdot \frac{1}{Y_3} + I_3 \cdot \ell^{j\text{Im}(\psi)} \cdot \frac{1}{Y_3} + I_{02} \cdot \frac{1}{Y_3} +$$

$$+ U_3 \cdot \ell^{j\text{Im}(\psi)} = 0.$$

Все уравнения, полученные по МУП и МКТ для двух вариантов схем замещения П-образной и Т-образной, решаются методом минимизации среднеквадратичной погрешности в пакете MathCad и определяется суммарная проводимость рассматриваемого участка сети.

Результаты расчёта показали, что погрешности определения параметров изоляции для отдельных участков сети на порядок больше погрешности определения суммарной проводимости изоляции. Результаты расчета, погрешности определения суммарной проводимости изоляции приведены в табл. 1, из которых следует, что оптимальным является выбор П-образной схемы замещения линии с отпайкой.

Таблица 1

Схема замещения	Метод расчёта	Gs max, %	Gs min, %	Bs max, %	Bs min, %
П	МКТ	33,293	-47,492	49,587	-45,116
	МУП	33,293	-47,492	49,587	-45,116
Т	МКТ	26,499	-57,333	64,817	-40,433
	МУП	27,563	-48,991	75,001	-35,631

На втором этапе анализируются результаты расчетов для случая ухудшения изоляции в фазе А на первом (головном) участке сети, при этом в фазах В и С считаем изоляцию не поврежденной. Расчет цифровой модели линии с отпайкой, имеющей П-образную схему замещения, выполним для нескольких вариантов ухудшения изоляции в фазе А:

$$1) \underline{Y}_{a1} = \underline{Y}_{sb} + 2\text{Re}(\underline{Y}_{sb});$$

$$2) \underline{Y}_{a1} = \underline{Y}_{sb} + 5\text{Re}(\underline{Y}_{sb});$$

$$3) \underline{Y}_{a1} = \underline{Y}_{sb} + 10\text{Re}(\underline{Y}_{sb});$$

$$4) \underline{Y}_{a1} = \underline{Y}_{sb} + 50\text{Re}(\underline{Y}_{sb}),$$

где \underline{Y}_{a1} – проводимость изоляции в фазе А на первом участке; \underline{Y}_{sb} – суммарная проводимость изоляции в фазе В

$$\underline{Y}_{sb} = \underline{Y}_{b1} + \underline{Y}_{b2} + \underline{Y}_{b3},$$

здесь \underline{Y}_{b1} – проводимость первого участка,

\underline{Y}_{b2} – проводимость второго участка,

\underline{Y}_{b3} – проводимость отпайки линии.

Расчеты цифровой модели выполняются по аналогии с работой [1] для выбранных вариантов ухудшения изоляции. В результате этих вычислений определяются комплексы всех необходимых напряжений и токов. Данные цифровой модели используются при моделировании измерений напряжений и токов для определения параметров изоляции по МУП и МКТ. Найденные параметры изоляции сопоставляем с параметрами изоляции, заданными в цифровой модели. Расчеты по МУП и МКТ дали практически одинаковый результат. Результаты исследования погрешности определения суммарной проводимости изоляции на цифровой модели по МУП, рассчитанные с коэффициентом $K_p = 0,001$, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Варианты ухудшения изоляции в фазе А	Gs max %	Gs min %	Bs max %	Bs min %
1)	13,267	-4,581	48,586	-13,339
2)	10,586	6,512	100,195	29,127
3)	7,341	4,893	197,114	113,548
4)	-15,543	-19,972	1218,074	1089,381

Коэффициент распределения проводимости m , заданный первоначально для всех трех фаз без повреждения, в случае ухудшения изоляции не соответствует распределению проводимости по участкам сети. Поэтому величина погрешности результатов расчета суммарной проводимости изоляции даже при измерении с коэффициентом точности $K_p = 0,000$ получилась отличная от нуля (данные для одного из вариантов ухудшения изоляции приведены в табл. 3).

Таблица 3

Вариант ухудшения изоляции	Gs max, %	Gs min, %	Bs max, %	Bs min, %
1)	6,129	6,129	16,363	16,363

Данный метод позволяет зафиксировать факт ухудшения состояния изоляции и определить погрешность результатов расчета суммарной проводимости.

Литература

1. Хусаинов, Ш.Н. Определение параметров изоляции для линии с отпайкой по результатам режимных параметров / Ш.Н. Хусаинов, А.В. Сидоров, Н.А. Хусаинова // Вестник ЮурГУ. Серия «Энергетика». – 2001. – Вып. 1. – № 4(04). – С. 55–59.
2. Хусаинов, Ш.Н. Улучшенный метод определения проводимостей изоляции участка сети, содержащего линию с отпайкой, по результатам измерения режимных параметров / Ш.Н. Хусаинов, А.В. Сидоров, Н.А. Хусаинова // Вестник ЮурГУ Серия «Энергетика». – 2002. – Вып. 2. – № 7(16). – С. 24–29

Хусаинов Шамиль Нагимович окончил энергетический факультет Челябинского политехнического института (ныне Южно-Уральский государственный университет) в 1960 году. В 1988 году получил ученую степень доктора технических наук. Защита проходила в Московском энергетическом институте (техническом университете) по теме: «Развитие теории и методов анализа электрических схем с многополюсными элементами». Утвержден в звании профессора в 1999 году. В настоящее время работает в Южно-Уральском государственном университете в должности заведующего кафедрой «Теоретические основы электротехники».

Нараева Рузалия Раисовна окончила энергетический факультет Челябинского политехнического института (ЧПИ) в 1983 году. В настоящее время работает в Южно-Уральском государственном университете в должности старшего преподавателя кафедры «Электротехника».

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА К АНАЛИЗУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЭС

К.А. Преображенский
г. Челябинск, ЮУрГУ

Рассматривается применение теории планирования эксперимента для обобщения результатов полученных с помощью виртуального моделирования электромагнитных процессов в СЭС. Описана методика планирования эксперимента и представлены графически результаты расчетов по регрессионным моделям. Оценена точность и адекватность применяемого метода и его эффективность.

При моделировании электромагнитных процессов в системах электроснабжения (СЭС) возникают трудности с обобщением решений, полученных численными методами [1]. Применение теории планирования эксперимента (ТПЭ) позволяет в аналитическом виде представить результаты численных исследований и с достаточной точностью оценить влияние различных факторов [2–4]. Методы планирования эксперимента позволяют преобразовать исходную систему дифференциальных уравнений в уравнения регрессии, аналитически связывающие выходные величины с интересующими параметрами. При этом уравнение связи между выходными параметрами Y и входными переменными $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ записываются в виде некоторого полинома – отрезка ряда Тейлора:

$$Y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i \cdot x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j < e \leq k} b_{ije} \cdot x_i \cdot x_j \cdot x_e, \quad (1)$$

где k – число переменных; $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}, b_{ije}$ – коэффициенты уравнения регрессии.

Достоинство уравнений регрессии заключается в простоте и наглядности получаемых выражений, удобстве их практического применения, в возможности графической интерпретации, которая способствует наглядности и облегчает анализ и оптимизацию системы и режимов работы. Возможность получения решения в аналитической форме позволяет исследовать влияние различных факторов на протекание процессов, определить области значений параметров, при которых имеет место оптимальное решение и т.д.

В настоящей работе ставится задача разработки и анализа регрессионных моделей СЭС, при питании нагрузок, включаемых через тиристорные ключи.

При разработке регрессионных моделей необходимо решить следующие вопросы: произвести выбор важнейших выходных величин (функций цели) и варьируемых параметров, обеспечиваю-

щих адекватность модели; определить область варьирования для входных переменных, охватывающую режимы, которые представляют интерес для практического использования; выбрать вид аппроксимирующего полинома (модели) и оптимальный план постановки эксперимента. Задача отыскания статистической связи (1) сводится к нахождению коэффициентов уравнения регрессии по результатам экспериментов в ряде точек исследуемого пространства. При этом сам эксперимент может быть проведен как на реальном объекте, так и на его математической модели [3].

В теории планирования эксперимента сформулированы требования и условия, которые должны учитываться при выборе зависимых переменных (откликов, выходов, функций цели) и независимых переменных [3]. Зависимая переменная должна быть единственной, однозначной, иметь ясный физический смысл, характеризоваться числом. Важно также для хорошей аппроксимации действительных зависимостей, чтобы функция цели была непрерывной и достаточно «гладкой» при изменении выбранных факторов.

В качестве зависимых переменных (функций цели) лучше выбрать основные показатели, определяющие качество электроэнергии и эффективность ее потребления – $\cos \varphi$ и коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения сети (K_U).

В качестве независимых переменных в уравнениях регрессии достаточно просто выбрать физические параметры силовой цепи СЭС. Однако лучше для обобщения результатов по возможности переходить к относительным величинам.

Для примера рассмотрена простейшая СЭС, состоящая из неидеальной сети и активно-индуктивной нагрузки включенной через тиристорные ключи (рис. 1).

Проведенный предварительный анализ электромагнитных процессов в СЭС показал, что зависимости важнейших величин, характеризующих установившийся режим в функции выбранных параметров, достаточно непрерывны. Однако, кривизна поверхности откликов все же такова, что

вряд ли может быть описана линейным уравнением даже в весьма узкой области факторного пространства.

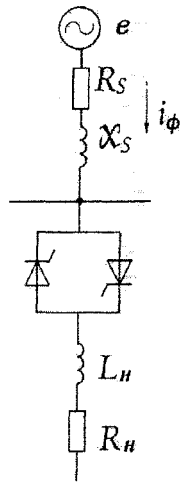


Рис. 1. Однофазная СЭС

Для получения регрессионных уравнений СЭС была использована матрица центрального композиционного ротatable-плана второго порядка (РЦКП) [3]. Рассмотрим методику проведения эксперимента. Обычно в уравнении (1) независимые переменные представляются в нормированном виде:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (2)$$

где x_i – кодовое значение i -го фактора; X_i – натуральное текущее значение i -го фактора; X_{i0} – начальный (нулевой) уровень фактора; ΔX_i – интервал (полуинтервал) варьирования i -го фактора

$$\Delta X_i = \frac{X_{i \max} - X_{i \min}}{2}. \quad (3)$$

После кодирования уровни факторов принимают значения -1 и $+1$. В качестве нулевого уровня принимают центр интервала, в котором предполагается вести эксперимент.

С целью сокращения числа опытов для планов второго порядка обычно используют в качестве ядра ортогональные планы второго порядка (полный факторный эксперимент 2^k или дробную реплику 2^{k-1} , а затем достраивают их до планов второго порядка [3]. Такие планы получили название композиционных. В зависимости от того, какие точки добавляют к плану первого порядка, различают центральные и нецентральные композиционные планы второго порядка [3]. При центральном композиционном планировании к ядру плана, содержащему $n_c = 2^{k-p}$ точек с координатами $(+1, 1, \dots, 1)$, добавляются n_0 – центральных точек $(0, 0, \dots, 0)$ и n_α – так называемых звездных точек, расположенных попарно соответственно на коор-

динатных осях и удаленных от центра на расстоянии $(\pm \alpha_1, \pm \alpha_2, \dots, \pm \alpha_k)$. Общее число опытов будет равно $N = 2^{k-1} + 2k + n_0$, где k – число факторов. В зависимости от числа опытов в центре, план эксперимента можно сделать почти ортогональным или равномерным. Равномерность плана – это независимость дисперсии параметра оптимизации от расстояния, измеряемого до центра области планирования эксперимента [3].

Виртуальная модель, построенная в среде Mat-Lab + Simulink, для схемы, приведенной на рис. 1, представлена на рис. 2.

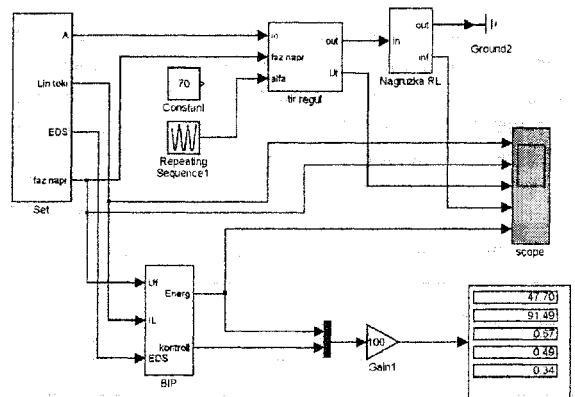


Рис. 2. Виртуальная модель СЭС

При планировании эксперимента важен выбор факторов. В качестве базисной величины было принято реактивное сопротивление сети X_s .

В качестве физических параметров выбирались: активное сопротивление нагрузки R_n , индуктивное сопротивление нагрузки X_n , активное сопротивление сети R_s , и угол управления тиристорного регулятора. Для уменьшения количества факторов были использованы обобщенные параметры: $\cos \varphi$ нагрузки $\cos \varphi_n = R_n / X_n$; относительное активное сопротивление сети R_s / X_n ; относительное активное сопротивление нагрузки R_n / X_n , а также угол управления α .

В качестве откликов при исследовании принимались: результирующий $\cos \varphi$ сети и коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения в точке присоединения к сети (K_U).

Пределы варьирования независимых переменных были выбраны с учетом возможных соотношений для реальных сетей. При этом учитывалось, что при расширении пределов варьирования снижается точность регрессионных моделей. Были приняты пределы варьирования:

$$\cos \varphi_n = 0,7 \dots 0,96; \quad R_s / X_n = 0,15 \dots 0,35; \\ R_n / X_n = 20 \dots 50; \quad \alpha = 50 \dots 90.$$

Целесообразно провести предварительное отсеивание малозначимых факторов.

Такое отсеивание проведенное по методу Платтета-Бермана [5] показало, что фактор R_s / X_n является малозначимым.

После проведения отсеивающего эксперимента можно приступить непосредственно к планированию эксперимента.

Эксперимент был выполнен как симметричный рототабельный центральный композиционный равномерный план второго порядка для $k = 3$ факторов со звездными точками [5]. Звездные точки позволяют дополнить уравнение регрессии членами с квадратами взаимодействий факторов, что повышает точность регрессионной модели.

Согласно плана эксперимента для заданных уровней обобщенных параметров (факторов) схемы были найдены физические параметры сети и проведено 15 опытов. Результаты цифрового моделирования сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты цифрового моделирования

№ опыта	$Y_1 = \cos \varphi_s$	$Y_2 = K_U (\%)$
1	0,68	0,81
2	0,44	2,09
3	0,68	0,17
4	0,45	0,79
5	0,88	3,68
6	0,65	4,81
7	0,89	1,48
8	0,67	1,98
9	0,79	0,85
10	0,50	1,69
11	0,66	3,18
12	0,67	0,95
13	0,56	0,93
14	0,85	3,62
15	0,66	1,52

В качестве выходных величин приведены основные параметры установившегося режима: установившееся значение $\cos \varphi$ сети; коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения сети K_U .

При обработке данных, полученных путем реализации запланированного эксперимента на исходной модели в среде MatLab+Simulink использован метод наименьших квадратов. Коэффициенты модели (4) удобно рассчитывать по формулам:

$$\begin{aligned}
 b_0 &= \frac{1}{a_0} \cdot \sum_{u=1}^N Y_u \\
 b_i &= \frac{1}{a_1} \cdot \sum_{u=1}^N x_{iu} Y_u \\
 b_{ii} &= \frac{1}{a_2} \cdot \sum_{u=1}^N Y_u \cdot (x_{iu}^2 - a) \\
 b_{ij} &= \frac{1}{a_3} \cdot \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} Y_u \\
 b_{ije} &= \frac{1}{a_3} \cdot \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} x_{ie} Y_u \\
 a_0 &= p^k - 2k + 1 \\
 a_1 &= \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \\
 a_2 &= \sum_{u=1}^N (x_{iu}^2 - a) \\
 a_3 &= p^k
 \end{aligned} \tag{4}$$

где N – общее число опытов; k – число факторов, равное 3; p – количество уровней планирования, в нашем случае равное 2.

Рассчитанные по программе в среде Matcad коэффициенты регрессии при кодированных переменных для выходных величин $\cos \varphi$, K_U сведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты регрессии

Факторы	Коэффициенты уравнения регрессии		Коэффициенты для кодированных значений факторов для соответствующих откликов	
	ист.	кодированные	$\cos \varphi$	K_U
x_0	x_0	b_0	0,6690	1,9033
$x_1 = \alpha$	x_1	b_1	-0,1157	0,4154
$x_2 = R_n / X_s$	x_2	b_2	0,0044	-0,8837
$x_3 = \cos \varphi_n$	x_3	b_3	0,1100	1,0370
$x_4 = (x_1^2 - a)$	x_4	b_4	-0,0171	-0,2939
$x_5 = (x_2^2 - a)$	x_5	b_5	-0,0051	0,2442
$x_6 = (x_3^2 - a)$	x_6	b_6	0,0241	0,3864
$x_1 x_2$	$x_1 x_2$	b_{12}	(0,0028)	-0,1612
$x_2 x_3$	$x_2 x_3$	b_{23}	(0,0026)	-0,3862
$x_1 x_3$	$x_1 x_3$	b_{13}	(0,0021)	(-0,0337)
$x_1 x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	b_{123}	(0,0014)	(0,0037)

Для перехода от коэффициентов при кодированных факторах к коэффициентам при натуральных (обобщенных) параметрах следует воспользоваться соотношением (5).

Соотношение перехода от кодированных значений факторов к натуральным:

$$x_i = \frac{2 \cdot (X_i - X_{10})}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (5)$$

Важным этапом исследования методами планирования эксперимента является проверка адекватности модели.

При оценке значимости коэффициентов b_i используют критерий Стьюдента:

$$|b_i| > t \sqrt{\sigma^2(Y)/N}, \quad (6)$$

где t – значения критерия Стьюдента при числе степеней свободы $f = N - 1$; N – число экспериментов, использованных для получения уравнения (1), а адекватность уравнения после отсеивания несущественно влияющих коэффициентов проверяется по критерию Фишера [3]:

$$F_{\text{расч}} = \frac{\sigma^2(Y)_{\text{ад}}}{\sigma^2(Y)_{\text{вос}}} < F_{\text{табл}}, \quad (7)$$

где $\sigma^2(Y)_{\text{ад}}$ – дисперсия адекватности, вычисляемая по формуле:

$$\sigma^2(Y)_{\text{ад}} = \frac{1}{N - q} \sum_{k=1}^N (Y_k - \hat{Y}_k)^2, \quad (8)$$

где q – число членов аппроксимирующего полинома;

Y_k – значение функции отклика, полученного в результате моделирования, для k -го сочетания параметров; \hat{Y}_k – то же значение, рассчитанное по уравнению регрессии.

Результаты статистического анализа сведены в табл. 3. Из таблицы следует, что все уравнения для значений откликов могут быть признаны адекватными виртуальной модели, так как во всех случаях $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$.

Максимально зарегистрированное отклонение (погрешность) для $Y_1 = \cos \varphi$ не превышает 2 %. Максимально зарегистрированная погрешность для $Y_2 = K_U$ достаточно велика (18,25 %), но учитывая, что само K_U не должно превышать 8 %, может быть признана приемлемой.

Таблица 3
Результаты статистического анализа

Отклик	$\varepsilon, \%$	t	$\sigma(Y)_{\text{вос}}^2$	$ b_i >$	q	N
$Y_1 = \cos \varphi$	2	2,140	0,0057962	0,0036966	7	15
$Y_2 = K_U$	8	2,140	0,0761333	0,042067	9	15
Отклик	f_1	f_2	$\sigma(Y)_{\text{ад}}^2$	$F_{\text{расч}}$	$F_{\text{табл}}$	$\delta_{\max}, \%$
$Y_1 = \cos \varphi$	8	6	8,244E-05	1,841987	4	1,96
$Y_2 = K_U$	6	8	0,0131260	2,264561	3,6	18,25

Таким образом, проведенный анализ показал, что полученные уравнения регрессии могут обеспечить приемлемую точность расчетов основных электрических величин, характеризующих установившийся режим работы СЭС.

Для более наглядного анализа влияния факторов на значения выходных величин можно выполнить графические построения [6].

На рис. 3–4 приведено семейство поверхностей, построенных по уравнениям регрессии, для исследуемых факторов.

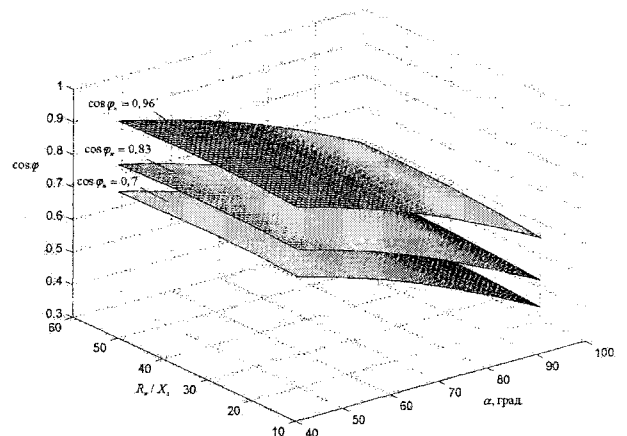


Рис. 3. Семейство поверхностей, отображающих зависимость результирующего $\cos \varphi$ от параметров нагрузки и угла управления

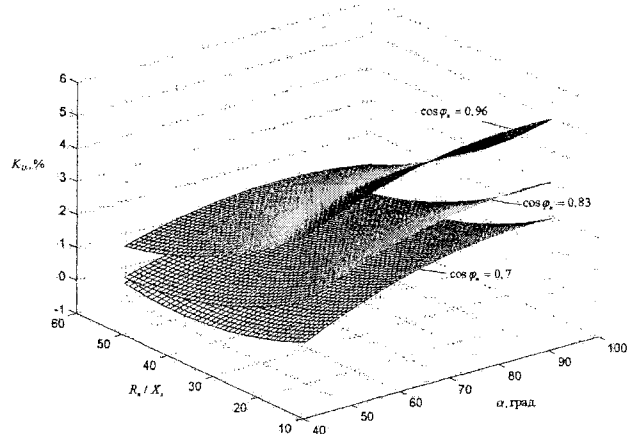


Рис. 4. Семейство поверхностей, отображающих зависимость коэффициента K_U от параметров нагрузки и угла управления

Построение проводилось при 3-х значениях $x_3 = \cos \varphi_n$, соответствующих уровням $-1, 0, +1$, для абсолютного значения X_2 соответственно $0,7; 0,83; 0,96$.

Из рис. 3 видно, что результирующий $\cos \varphi$ выше, если выше $\cos \varphi_n$, с ростом угла управления он падает и слабо зависит от индуктивности сети. Из рис. 4 видно, что коэффициент искажения растет с ростом $\cos \varphi_n$, уменьшением активного сопротивления нагрузки (или увеличением индуктивности сети) и ростом угла управления. Это не противоречит физическим представлениям.

Выводы

1. Применение теории планирования эксперимента позволило в аналитическом виде представить результаты численных исследований и на основе построения пространственных изображений с достаточной точностью оценить влияние различных факторов.

2. Разработаны регрессионные модели для определения $\cos \varphi$ сети и коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, обеспечивающие адекватность виртуальным моделям.

3. При питании нагрузок, включенных через тиристорные ключи, активное сопротивление сети является фактором, в наименьшей степени влияющим на коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения сети.

Литература

1. Хохлов, Ю.И. Комплекс виртуальных лабораторных работ по электроснабжению и энергетической электронике / Ю.И. Хохлов, М.В. Гельман, К.А. Преображенский // Труды Второй всероссийской научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB». – М.: ИПУ РАН, 2004. – С. 1940–1944 (электронное издание).

2. Гельман, М.В. Анализ установившихся и переходных процессов в колебательных автономных инверторах методом планирования экспериментов / М.В. Гельман, Х.К. Харасов, Г.Б. Худоносков // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентиляционных преобразователей: темат. сб. науч. тр. – Челябинск: ЧШ, 1979 – Вып. 223. – С. 94–99

3. Ивоботенко, Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б.А. Ивоботенко, Н.Ф. Ильинский, И.П. Копылов. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.

4. Ильинский, Н.Ф. Выбор некоторых оптимальных параметров систем электроснабжения промышленных предприятий с использованием методов планирования эксперимента и ЦВМ / Н.Ф. Ильинский, Э.А. Киреева, В.В. Каменева // Труды МЭИ. – М.: МЭИ, 1972. – Вып. 103. – С. 15–19

5. Хартман, К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман. – М.: Мир, 1997. – 278 с.

6. Дьяконов, В.П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 в математике и моделировании. Полное руководство пользователя / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс. – 2003. – 576 с.

Преображенский Кирилл Алексеевич – ассистент кафедры «Системы электроснабжения» ЮУрГУ Окончил ЮУрГУ в 2002 г Научные интересы – преобразовательная техника и повышение энергетических показателей СЭС.

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА КОРОНУ ПО ДАННЫМ ТЕЛЕМЕТРИИ

Л.А. Беляева, Б.Г. Булатов
г. Челябинск, ЮУрГУ

Рассмотрены вопросы определения потерь электроэнергии с учетом короны в темпе процесса, проведена оценка погрешностей, для ЛЭП-500 определены зависимости потерь мощности от напряжения для разных нагрузок и погодных условий.

Годовые потери электроэнергии на корону в электрических сетях РФ составляют более 4 млрд кВт·ч [1]. Они зависят от уровня рабочего напряжения сети, сечения проводов и конструкции фазы, но главным образом от погодных условий. Потери на корону при тумане и изморози возрастают в десятки раз по сравнению с потерями при хорошей погоде. Удельные потери на корону при различных климатических условиях получены экспериментальными методами и приведены в соответствующих таблицах справочников и руководящих указаний по учету потерь на корону.

Основная доля потерь на корону приходится на сети 500 кВ, особенно на Урале, где они составляют основу магистральной сети. Заметный вклад вносят и линии 220 кВ.

В отличие от нагрузочных потерь потери на корону имеют другую природу и определяются особенностями работы воздушной изоляции линий электропередач. Особый характер имеют и мероприятия, направленные на снижение потерь на корону, основу которых составляют различные методы регулирования рабочего напряжения сети. Очевидно в условиях рынка и компенсация затрат на потери энергии за счет короны должна формироваться по иным правилам, нежели для нагрузочных потерь. Законом «Об электроэнергетике», определено, что сетевые компании оплачивают потери электроэнергии в своих сетях за исключением тех потерь, которые зависят от нагрузки и включены в узловые цены на электроэнергию. Коммерческие и условно-постоянные технологические потери, в том числе и потери на корону, оплачивают РСК. Источником средств для оплаты этой составляющей потерь является сетевой тариф, собираемый с потребителей. Норматив на потери устанавливается службами по тарифам и все отклонения от него включаются в прибыль или в убытки, что и должно определять заинтересованность сетевых компаний в снижении потерь. Сегодня разработаны различные методы оценки и снижения нагрузочных потерь в электрических сетях 110–6,10 кВ.

В отличие от нагрузочной составляющей потерь электроэнергии потери на корону требуют дальнейших исследований и совершенствования методики учета. Основные погодные факторы,

решающим образом влияющие на величину потерь электроэнергии, не имеют четких границ при идентификации, что снижает достоверность расчетных методов.

В рыночных условиях становится актуальной задача оценки фактических потерь на корону в темпе процесса. Сегодня для её решения в сетях 220–500 кВ есть необходимая информационная база: все объекты сети оснащены средствами измерения параметров режима и устройствами телемеханики, активно внедряются системы автоматизации коммерческого учета электроэнергии. В ОИК АСДУ постоянно поступает телеинформация о параметрах режима по концам каждой ЛЭП и по каждому автотрансформатору. В этих условиях методика определения потерь на корону очевидна. По телеизмерениям активной мощности или по данным расхода электроэнергии по концам ЛЭП для принятого временного интервала Δt определяются общие потери мощности в ЛЭП. Потери, зависящие от нагрузки можно определить расчетом по П-образной схеме замещения, используя параметры телеизмерений. Потери на корону определяются как разность замеренных общих потерь в ветви и рассчитанных нагрузочных.

Оценим погрешности определения потерь на корону на примере конкретной ЛЭП-500. Эта линия выполнена проводом ЗАСО-330, имеет длину 186,6 км, параметры схемы замещения: $R=5,41$ Ом, $X=57,47$ Ом, $B=6,72 \cdot 10^{-4}$ См. Активная проводимость G зависит от погодных условий и определяется по табличным потерям на корону. По данным [1] удельные потери мощности на корону для линии при хорошей погоде составляют 2,8 кВт/км, в сухой снег – 11,0 кВт/км, в дождь – 36 кВт/км и при изморози – 96 кВт/км. При среднегодовых удельных потерях 9,0 кВт/км для ЛЭП-500 проводимость линии $G=6,718 \cdot 10^{-6}$ См.

Для оценки погрешностей разделения потерь в линии сформируем расчетом эталонный режим при известных погодных условиях и данных телеметрии в конце передачи $P_2=230$ МВт, $Q_2=100$ МВАр, $U_2=516$ кВ.

Определение параметров режима проведем с учетом распределенного характера параметров

линии. Волновое сопротивление линии и коэффициент распространения

$$Z_B = \sqrt{Z/Y} = \sqrt{(5,41 + j57,47)/(6,718 \cdot 10^{-6} + j6,72 \cdot 10^{-4})} = 292,8 + j12,3 \text{ Ом};$$

$$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y} = \beta_0 \cdot L + j\alpha_0 \cdot L = 0,0102 + j0,1967.$$

При известных параметрах режима в конце линии напряжение и ток в начале её определяются, как известно, по выражениям:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \cdot ch\gamma_0 L + \dot{I}_2 \cdot Z_B \cdot sh\gamma_0 L; \\ \dot{I}_1 &= \dot{U}_2 / Z_B \cdot sh\gamma_0 L + \dot{I}_2 \cdot ch\gamma_0 L. \end{aligned} \quad (1)$$

При токе I_2 в конце линии, определяемом расчётом по данным телеметрии $\sqrt{3} \cdot I_2 = \hat{S}_2 / U_2 = 445,7 + j193,8 \text{ А}$, расчёт по (1) даёт следующие результаты:

$$\dot{U}_1 = 519,52 + j25,45; \quad |U_1| = 520,15 \text{ кВ};$$

$$\sqrt{3} \cdot \dot{I}_1 = 440,8 + j155,3 \text{ А}; \quad P_1 = 232,941 \text{ МВт};$$

$$Q = -69,49 \text{ МВАр}.$$

Общие потери в линии, полученные по разности замеров мощностей P_1 и P_2 по концам линии, равны $\Delta P = 2,941 \text{ МВт}$.

Нагрузочные потери определим по формуле Г.Е. Поспелова [2]:

$$\begin{aligned} \Delta P_n &= \frac{S_2^2}{4 \cdot U_2^2} \cdot r_0 \cdot \left(\frac{sh2\beta L}{\beta} + \frac{sin2\alpha L}{\alpha} \right) + \\ &+ \frac{U_2^2}{4 \cdot Z_B^2} \cdot r_0 \cdot \left(\frac{sh2\beta L}{\beta} - \frac{sin2\alpha L}{\alpha} \right) + \\ &+ \frac{P_2 \cdot Z_B - Q_2 \cdot X_B}{2 \cdot \beta \cdot Z_B^2} \cdot r_0 \cdot (ch2\beta L - 1) - \\ &- \frac{Q_2 \cdot Z_B + P_2 \cdot X_B}{2 \cdot \alpha \cdot Z_B^2} \cdot r_0 \cdot (1 - cos2\alpha L). \end{aligned} \quad (2)$$

После подстановки всех параметров получим значение потерь $\Delta P_n = 1,1977 \text{ МВт}$, что позволяет определить точное значение потерь на корону:

$$\Delta P_k = 2,941 - 1,1978 = 1,743 \text{ МВт}.$$

Оценим погрешность разделения потерь на составляющие расчётом режима по П-образной схеме замещения ЛЭП с сосредоточенными параметрами, полагая, что параметры ЛЭП и необходимые параметры режима известны и достоверны.

Расчёт нагрузочных потерь проводим по следующему алгоритму: определяем зарядную мощность в конце ЛЭП, поток на выходе продольного сопротивления схемы замещения и потери в нем, равные $\Delta P = 1,077 \text{ МВт}$. Потери на корону определяются по балансу

$$\Delta P_k = P_1 - P_2 - \Delta P = 532,94 - 530 - 1,077 = 1,863 \text{ МВт}.$$

Погрешность составляет

$$\delta = \frac{1,863 - 1,743}{1,743} \cdot 100 = 7\%.$$

Для контроля достоверности телеизмерений по концам ЛЭП можно расчётом определить напряжение в начале линии в кВ

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + (P_2 \cdot R + Q_2 \cdot X)/U_2)^2 + ((P_2 \cdot X - Q_2 \cdot R)/U_2)^2} = |519,7 + j25,5| = 520,3.$$

и сравнить результат с телеизмерением. Совпадение результатов может служить мерой доверия к телеметрии и выявления при необходимости неисправного канала.

При оценке потерь на корону необходимо учитывать погрешности устройств и каналов телеметрии и измерительных трактов систем учета электроэнергии, температурные изменения активных сопротивлений ЛЭП, ошибки квантования, ошибки усреднения режима, определяемые циклическостью расчёта потерь на корону

Оценим ошибку квантования, полагая, что используемые для расчёта потерь режимные параметры U_2 и Q_2 измеряются средствами телемеханики, а мощности P_1 и P_2 определяются по данным АСКУЭ достаточно точно.

В этом случае при $I_n = 2000 \text{ А}$ трансформатора тока и вторичном преобразователе напряжения типа Е-855/1 при использовании 8-разрядного АЦП возможные масштабы квантов по мощности и напряжению составят

$$m_s = 6,77 \text{ МВА/квант} \quad \text{и} \quad m_u = 2,05 \text{ кВ/квант}.$$

При этом значения параметров режима в оперативно-информационном комплексе будут приняты равными $Q_2 = 94,8 \text{ МВАр}$ и $U_2 = 514,5 \text{ кВ}$, и расчётная оценка нагрузочных потерь и потерь на корону не выйдет за пределы 10%.

Использование данных телеметрии для определения потоков активной мощности и оценки общих потерь в ЛЭП неприемлемо, т.к. погрешность квантования в этом режиме почти в три раза превышает величину потерь.

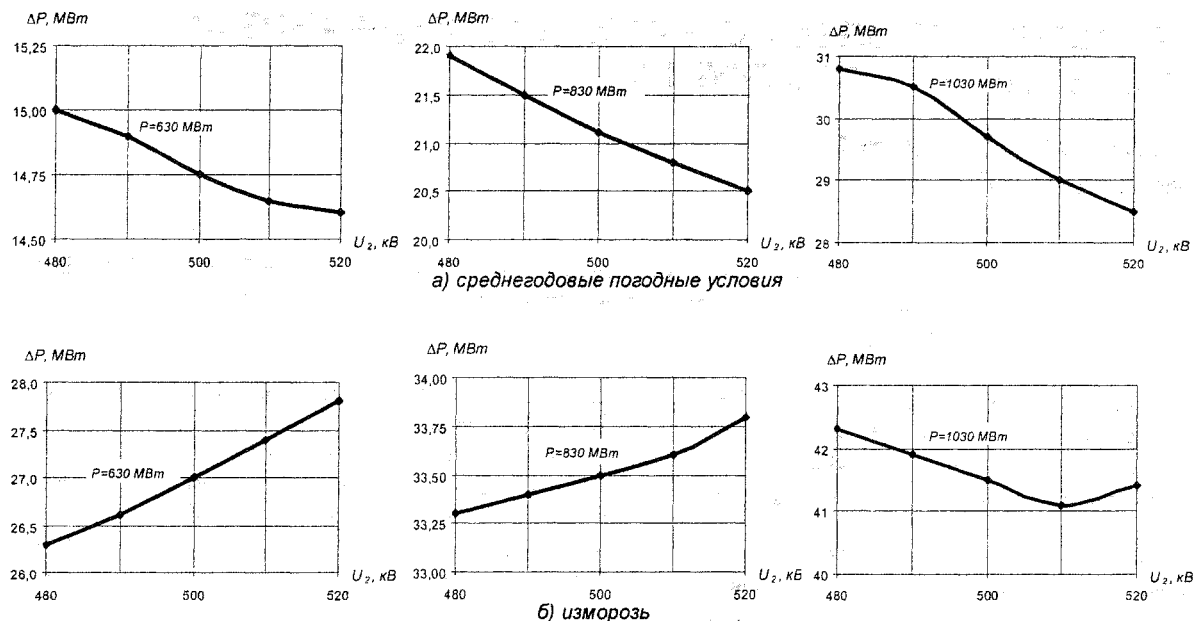
При мониторинге потерь на корону можно учесть также влияние изменений температуры на величину активного сопротивления линии для более точного определения нагрузочных потерь [2].

Погрешности оценки потерь на корону, связанные с циклическостью расчёта, определяются динамикой изменения режима передачи и, в первую очередь, напряжения.

Изменение напряжения передачи решающим образом влияет на эффективность режима.

На рисунке приведены зависимости общих потерь в линии от напряжения для разных передаваемых мощностей при среднегодовых погодных условиях и при самых неблагоприятных (изморозь).

В первом случае доля потерь на корону мала и общие потери определяются в основном нагрузоч-



Потери мощности при разных нагрузках

ной составляющей, что приводит к снижению потерь при росте напряжения передачи во всем диапазоне передаваемых мощностей. При плохой погоде в режимах малых нагрузок, когда потери на корону выше нагрузочных, оптимальные режимы находятся на нижней границе области допустимых напряжений. Лишь с ростом передаваемой мощности уровень оптимального напряжения перемещается в допустимую область.

В этих условиях оптимальное управление режимом передачи может дать значительный эффект за счет снижения потерь электроэнергии. Для целей регулирования напряжения могут использоваться отдельные устройства гибкого управления режимами линий переменного тока (FAST) [4] или автотрансформаторы с РПН [5], позволяющие за счет принудительного распределения потоков мощности в контурах влиять на режим напряжения.

Литература

1 Железко, Ю.С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов /

Ю.С. Железко, А.В. Артемьев, О.В. Савченко. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 280 с.

2. Поспелов, Г.Е. АСУ и оптимизация режимов энергосистем/ Г.Е. Поспелов, В.В. Керного. – Минск, «Вышэйшй. школа», 1977 – 320 с.

3. Герасименко, А.А. Учет внутримесячного хода температуры проводов воздушных линий и электропотребления при расчете потерь электроэнергии в распределительных сетях/ А.А. Герасименко, Г.С. Тимофеев // Энергосистема: управление, качество, безопасность: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. 496 с.

4. Воронай, Н.И. Координированное противоаварийное управление нагрузкой и устройствами FAST / Н.И. Воронай, П.В. Этингов, А.С. Удалов и др. // Электричество. – 2005. – №10. – С. 25–37

5. Булатов, Б.Г. Мероприятия по экономии потерь электроэнергии в электрических сетях с учетом короны / Б.Г. Булатов, Л.А. Лезьева // Энергетика, управление, качество и эффективность: сборник трудов второй Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Благовещенск, 2000.

Беляева Лариса Александровна в 1998 г. окончила Южно-Уральский государственный университет. Преподаватель кафедры «Электрические станции, сети и системы» ЮУрГУ.

Булатов Борис Георгиевич в 1961 г. окончил Челябинский политехнический институт. Доцент, кандидат техн. наук, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы» ЮУрГУ.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ ЗАЩИЩЕННОГО ГРУНТА

Л.А. Баранов, М.Г. Бурнаев
г. Челябинск, ЧГАУ

Рассмотрены методы обеззараживания почвы. Показана возможность применения электротермической обработки почвы защищенного грунта и ее преимущества.

Ежедневно человек нуждается в потреблении свежих овощей, для выращивания которых используются сооружения защищенного грунта (парники, теплицы и т.д.). В данных сооружениях для получения высокой производительности сельскохозяйственных растений создается благоприятный микроклимат, который в свою очередь ведет к соответствующему росту болезней и вредителей сельскохозяйственных растений. Болезнь растения – это нарушение нормального строения и обмена веществ клеток, органов и целого растения под воздействием фитопатогенов. Фитопатоген, проникая в растения, нарушает нормальный процесс жизнедеятельности, что резко снижает урожайность или ухудшает качество продукции. Корневая гниль сеянцев и взрослых растений – одно из самых распространенных заболеваний растений семейства тыквенных в теплицах. Болезнь может проявиться уже в фазе семядольных листьев, при этом подсемядольная часть стебля становится водянистой, утончается и внезапно полегает. У взрослых растений болезнь начинается с пожелтения и увядания нижних листьев. Прикорневая часть стебля и корни буреют и размочаливаются, молодые мочковатые корни не развиваются. Завязи отмирают, зеленцы недоразвиваются. Больные растения засыхают и увядают. Возбудители заражают растение через корневую систему. Грибы хорошо сохраняются в течении длительного времени в почвенных субстратах и быстро накапливаются при бессменном выращивании овощных культур семейства тыквенные. Урожайность из-за болезни может снизиться на 40–50 % [1]. Почва является основной средой размножения и обитания болезней и вредителей растений. Поэтому в культивационных сооружениях защищенного грунта заменяют почву через 2–4 года, что требует больших затрат. При сильном заражении почву приходится менять ежегодно. Экономические расчеты показывают, что часто бывает целесообразнее осуществлять перенос теплицы на новое место, чем ежегодно менять в ней почву. Наиболее эффективный способ борьбы с вредителями и болезнями растений заключается в термическом обеззараживании защищенного грунта. Для обеззараживания почвы наиболее широкое применение

получили следующие способы: паровой, химический и электродный.

При химическом способе обеззараживания для борьбы с вредителями, болезнями и сорняками широко используются пестициды и биопрепараты, для которых необходимо знать и строго соблюдать установленные регламенты при хранении, транспортировке и их применении. К положительной стороне данного способа стоит отнести его избирательность в зависимости от вида вредителя или болезни. Но данный способ имеет ряд серьезных недостатков: существует серьезная опасность отравления персонала, вредное для растений последствие – токсичность почвы, довольно длительная продолжительность обработки почвы. Кроме того, накладываются ограничительные рамки по расположению теплиц, которые должны быть не ближе 1000 м от населенных пунктов, скотных дворов, птичников и источников водоснабжения. Встает вопрос о способе, условии и месте хранения химических препаратов. Более того химическое обеззараживание можно проводить при температуре почвы не выше 15–20 °С, в противном случае происходит интенсивное выделение ядовитых газов. В связи с этим большинство тепличных хозяйств отдают предпочтение паровому способу обеззараживания.

Паровой способ обеззараживания при температуре близкой к 100 °С является наиболее совершенным. После парового обеззараживания восстанавливается плодородие почвы, сама операция сравнительно безвредна для человека и растений. Пропаривание грунта в течении от 30 до 60 мин, считая с момента достижения температуры 100 °С во всем обрабатываемом слое почвы, уничтожает вредителей и возбудителей болезней. Паровой способ обработки почвы можно считать перспективным при использовании различных устройств и приспособлений. Однако при длительном воздействии пара в почве вместе с вредными погибают и полезные бактерии, повышается ее соленасыщенность, что вредно отражается на развитии растений: разрушаются коллоиды, уменьшается капиллярность и влагоемкость почвы. Кроме того, при длительном воздействии высокой температуры в почве образуются вредные продукты, которые способны сохранять годами свои токсические

свойства. Следует также отметить, что применять паровой способ часто невозможно из-за больших энергетических затрат и необходимости использования специальной паровой установки.

Из многих способов обеззараживания почвы с помощью электрического тока сравнительно эффективным считается электродный. При этом способе обеззараживания металлические пластинчатые электроды, помещенные в почву, включают непосредственно в электрическую сеть. Электрический ток, проходя через почву, служит не только источником тепловой энергии, но и фактором воздействия на микроорганизмы и вредителей, находящихся в почве. Время электродного обеззараживания защищенного грунта значительно меньше и составляет 60–90 с. Кроме того, электродный способ обеззараживания по сравнению с химическим экологически безопасен. Почву можно использовать сразу же после обеззараживания. Сам процесс легко контролируется и может быть автоматизирован. Летальный исход для вредителей и болезней растений происходит при меньших на 20–30 °С температурах обеззараживания благодаря воздействию на них электрического тока, проходящего через почву. В совхозе «Гурьевский» Гурьевской области были проведены опыты, результаты которых свидетельствуют о положительном влиянии электротермической обработки почвы (табл. 1). В результате обработки содержание нитратного азота увеличивается в 1,5 раза, также возрастает содержание аммонийного азота, что положительно влияет на рост растений. Другие элементы почвы остаются в норме или увеличиваются незначительно.

Почти во всех опытах показания термометров брались через 5 минут после снятия напряжения.

Несмотря на эффективность, электродное обеззараживание имеет существенный недостаток, который заключается в том, что прилегающий к электродам слой почвы (контактный) нагревается

гораздо быстрее, чем остальная масса. С повышением температуры начинает возрастать переходное сопротивление этого слоя, что ведет к замедлению процесса. Для уменьшения этого явления в Армянском научно-исследовательском институте механизации и электрификации сельского хозяйства был разработан электрод, представляющий собой плоскую сварную коробку, состоящую из двух металлических пластин толщиной 1,5 мм каждая, между которыми оставлен зазор в 2 мм [2]. Коробка снабжена патрубками, через которые хладагент, например холодная вода, циркулирует в ее внутренней полости во время обеззараживания почвы. Сложная конструкция данных электродов не позволяет широко их использовать. Наиболее простым способом снижения переходного контактного сопротивления «электрод–почва» является подача воды к поверхности электрода из листовой стали.

Первая разработанная установка для электродного обеззараживания грунта представляет из себя деревянный ящик с установленными внутри электродами из листовой стали и расположенными друг от друга на определенном расстоянии. Обеззараживаемая почва увлажняется до 30 % влажности, после чего загружается в установку и на электроды подается напряжение 220 В промышленной частоты [3]. Электродное обеззараживание грунта в данной установке не нашло широкого применения из-за большой трудоемкости, заключающейся в том, что почву необходимо извлекать из теплицы, транспортировать к месту обеззараживания и снова возводить в теплицу. Кроме того, существует риск повторного заражения почвы. В «Казсельхозмеханизации» была создана наиболее удачная мобильная установка для электротермического обеззараживания почвы [4]. Дисковые электроды этой установки выполнены из нержавеющей стали и изолированы от вала изоляционными втулками, в изоляционной плите сделаны прорези для уста-

Таблица 1

Результаты агрохимического анализа тепличной почвы

Состояние почвы	Содержание нитратного азота, мг/кг	Содержание аммонийного азота, мг/кг	Содержание воднорастворимого фосфора, мг/кг	Содержание хлориона, мг/кг	Содержание кальция, мг/кг	Содержание магния, мг/кг	Содержание калия, мг/кг	РН (кислотность)
Контрольная проба (ненагретая почва)	1010	20	4	1417	1200	330	350	8,2
Нагретая до 90 °С без выдержки	1500	27	4,1	1680	14800	390	375	8,2
Нагретая до 90 °С с выдержкой 5 мин	1160	22	3,7	1566	1300	360	355	8,1

новки электродов. Для уменьшения утечки тока к боковым электродам подключен нулевой провод питающей сети.

Так как большинство обитающих в почве вредных микроорганизмов находятся на небольшой глубине около 25 см, предусмотрена обработка именно на эту глубину. Изменение глубины обработки достигается путем установки дисковых электродов различного диаметра.

Работа данной установки заключается в следующем. За два дня до обработки почву увлажняют до 40 % влажности и проверяют готовность стерилизатора к работе. Включением электропривода создается вращательное движение электродов, которые погружаются в почву. Одновременно открывается кран, и вода через распределительный коллектор стекает крупными каплями по поверхности электродов, обеспечивая контакт между электродами и почвой. После заглубления электродов на них подается напряжение. Время обработки почвы зависит от ее структуры и степени влажности. При нагреве почвы до температуры 80 °С включается электропривод и стерилизатор перемещается на новое место обработки. Затем процесс повторяется.

Питание электродов осуществляется при помощи токосъемного устройства, включающего в себя набор токосъемных колец и щеткодержателей.

Управление осуществляется тумблерами, установленными на рукоятках стерилизатора.

Данная установка МЭОП-1 позволяет обеззараживать грунт непосредственно в теплице. Недостатком является то, что оператор находится в непосредственной близости от установки и подвергается опасности поражения электрическим током. К тому же оператор постоянно находится на ногах, что приводит его к усталости с уменьшением производительности.

При электродном способе обеззараживания почвы энергетические и эксплуатационные показатели в значительной степени зависят от схемы включения электродов. Если электроды соединить в треугольник (рис. 1,а), то помимо основного тока нагрузки, через почву от крайних электродов к заземляющему электроду нуля трансформатора будет протекать ток утечки, что вызовет большие потери электроэнергии. При этом вследствие большого шагового напряжения возникает опасность поражения электрическим током обслуживающего персонала. Соединение электродов в звезду с подключением нулевых электродов к заземленному нулю трансформатора (рис. 1,б) наиболее приемлемо с точки зрения безопасности и симметричности нагрузок. Время обеззараживания в данном случае возрастает в 3 раза, и, следовательно, во столько же раз снижается производительность установки. Когда основные электроды включены в треугольник, а дополнительные соединены с заземленным нулем трансформатора (рис. 1,в), последние становятся экранирующими с

позиции электробезопасности. Но здесь из-за асимметрии фаз интенсивность процесса на крайних участках почвы в 3 раза ниже, чем на других. С увеличением общего числа электродов асимметричность уменьшается, однако при этом повышается необходимая мощность установки. Чтобы получить одинаковую интенсивность участков, необходимо дополнительные электроды размещать от крайних основных на расстоянии, которое в $\sqrt{3}$ раза меньше, чем расстояние между основными.

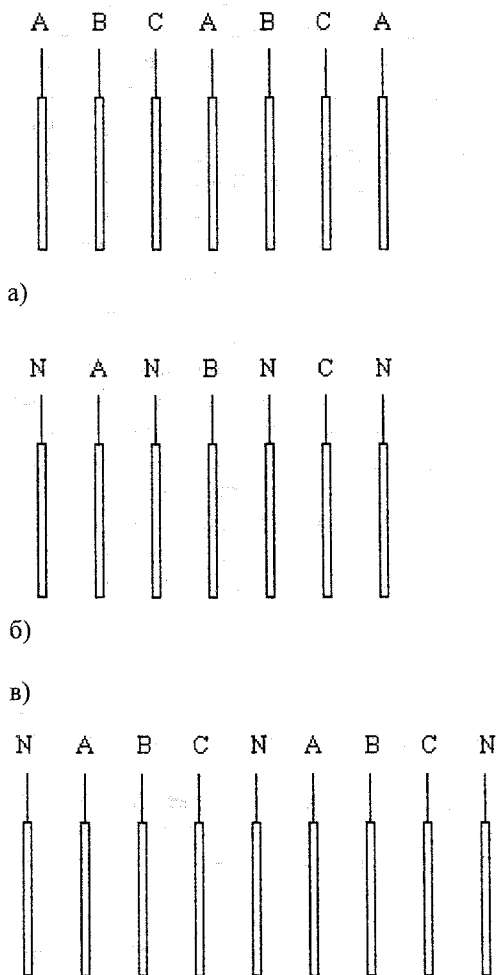


Рис. 1. Схемы включения электродов при обеззараживании почвы: а) соединение электродов в треугольник; б) соединение электродов в звезду; в) соединение электродов в треугольник с нулем; А, В, С и N-фазы А, В, С и нулевой провод

В Ереванском тепличном хозяйстве определили ориентировочные потери электроэнергии на утечки электрического тока [5]. Для этого измеряли ее расход при однофазном включении двух или трех электродов по схемам: нуль-фаза-нуль и фаза-нуль-фаза. Из табл. 2 видно, что при прочих равных условиях в схемах а) и б) величина расхода энергии в 1,8–1,9 раз больше, чем в схеме в), когда к крайним электродам подается нуль. Фактически расход электроэнергии в схемах в) и г), где нуль подается на боковые электроды, превышает рас-

Определение потерь электроэнергии на ток утечки

Число электродов	Схема включения электродов	Расход электроэнергии	
		кВт·ч/м ³	% от расчетного значения $\Xi=34,2$ кВт·ч/м ³
2	а) фаза–нуль	87,20	255,0
3	б) фаза–нуль–фаза	90,10	263,5
3	в) нуль–фаза–нуль	47,50	138,9
7	г) в звезду при неподвижных электродах	47,85	139,9
7	д) в звезду при движущихся электродах	44,90	131,3

четный на 30–40 %. Это объясняется ее потерями вследствие искажения электрического поля у краев электродов, передачи тепла соседним участкам почвы и воздуху, нагреву электродов и деталей установки. Кроме того, потери могут возникнуть на участке кабеля между счетчиком и установкой.

Перерасход электроэнергии в 2,55 и 2,63 раза в схемах а) и б) вызван утечкой тока через грунт от крайних электродов к нулю трансформатора.

Когда происходит утечка с одного электрода на один промежуток, включенный между фазой и нулем, потери достигают 90 % от расхода в межэлектродном пространстве.

При соединении семи электродов в звезду по схеме А–N–B–N–C–N–A утечка с двух крайних электродов на шесть промежутков, включенных между фазой и нулем, или с одного электрода на три промежутка вызовет относительные потери, которые в 3 раза меньше, чем в предыдущем случае.

При включении семи электродов в треугольник (см. рис. 1,а) абсолютные потери на утечку от крайних электродов останутся такими же, как и при звезде с подключением фазы на крайние электроды. Но так как мощность в межэлектродном пространстве возрастет в 3 раза, относительные потери на утечку снизятся в 3 раза по сравнению с потерями в варианте со звездой при подключении фазы на крайние электроды и составят 10 % от расхода электроэнергии в межэлектродном пространстве.

В Челябинском государственном агроинженерном университете разрабатывается мобильная установка при финансовой поддержке правительства Челябинской области, экспериментальное включение которой планируется провести в тепличном хозяйстве ОАО «Тепличный». Эта установка представляет собой металлический каркас, оснащенный электродной камерой с набором дисковых электродов, расположенных друг от друга

на определенном расстоянии, и электроприводом ведущих колес и электродов. Предполагается, что установка будет перемещаться по металлическим рельсам, которые служат направляющими и одновременно экранирующими электродами для уменьшения тока утечки. Данная установка может служить не только для обеззараживания защищенного грунта, но и для обработки почвы в период предпосевной и культивационной обработки земли. Контроль и управление данной установкой будет осуществляться дистанционно. В данном случае полностью исключается риск поражения электрическим током обслуживающего персонала в момент обеззараживания грунта. Установка позволяет полностью автоматизировать процесс обеззараживания, что дает возможность использовать ее в ночные часы при сниженной стоимости электрической энергии.

Литература

1. *Защита растений от вредителей: учебное пособие / под ред. В.В. Исаичева. – М.: Колос, 2002. – 472 с.*
2. *Акопян, Р.А. Установка для электротермического обеззараживания почвы / Р.А. Акопян // Техника в сельском хозяйстве. – 1969. – 296 с.*
3. *Прищеп, Л.Г. Эффективная электрификация защищенного грунта: учебное пособие / Л.Г. Прищеп. – М.: Колос, 1980. – 76 с.*
4. *Каламкашев М.Х. Исследование условий электродного применения нагрева почвы / М.Х. Каламкашев, Л.А. Баранов // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. – 1981. – № 3. – С. 84–87.*
5. *Каламкашев М.Х. Исследование электродного нагрева защищенного грунта / М.Х. Каламкашев, Л.А. Баранов // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. – 1980. – №4. – С. 85–87.*

Баранов Леонид Афанасьевич окончил факультет электрификации сельского хозяйства Казахского сельскохозяйственного института в 1960 г. Защитил кандидатскую диссертацию в 1969 г., в 1993 – докторскую. Профессиональные интересы – электро- тепло- снабжение сельского хозяйства. Доктор технических наук, профессор.

Бурнаев Михаил Гаривжанович окончил в 2005 г. Челябинский государственный агроинженерный университет. Аспирант кафедры применения электрической энергии в сельском хозяйстве ЧГАУ

СВЯЗЬ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПЕЙ СО СПЕКТРОМ МАТРИЦ ОДНОРОДНОГО БАЗИСА

М.И. Грамм
г. Челябинск, ЮУрГУ

Спектр собственных чисел матриц состояния цепей в однородном базисе может служить основой для оптимизации параметров подключения одной сложной цепи к другой. Наличие современных стандартных компьютерных программ расчёта собственных векторов и чисел делает предлагаемые простые теоремы наиболее производительной основой для расчёта параметров оптимальной передачи мощностей.

Предложенные в [1] методы согласования сложных цепей на уровне спектрального расщепления матриц однородного базиса оптимизируют передачу суммарной мощности через сечение S (рис. 1) сопряжения двух цепей – генератора с матрично-векторными параметрами $EG - RG$ и нагрузки с параметрами $EL - RL$. Ниже показано, что в дополнение к этому общему решению спектральная основа позволяет также оценить диапазон скалярных величин входных сопротивлений и реально достижимых мощностей в сечении сопряжения для любой заданной нерасщеплённой схемы. В известной литературе, касающейся таких оценок ([2], [3] и др.), спектральные характеристики матриц не использовались. Основа для таких оценок описана далее в форме несложных теорем для линейных или линеаризованных цепей.

Известно, что матрицы систем уравнений состояния цепей в однородном базисе практически всегда являются положительно определёнными [4]. Это означает, что они могут служить основой для квадратичного функционала F , равного мощности PR потерь [5]. Решение для конкретного состояния цепи в базисе контурных токов (рис. 1) или в базисе узловых потенциалов (рис. 2) всегда соответствует минимуму функционала и минимуму электрических потерь в цепи. Например, как для связной, так и для несвязной цепей по рис. 2 потери могут быть записаны с помощью матрицы G проводимостей цепи и вектора φ потенциалов в виде разницы двух скалярных произведений – мощности

PR и удвоенной мощности PJ источников:

$$F = PR - 2 \cdot PJ = \varphi^T \cdot G \cdot \varphi - 2 \cdot \varphi^T \cdot J. \quad (1)$$

В частном случае, когда вектор токов J оказался одним из собственных векторов $V^{(k)}$ матрицы G ($k = 1, 2, \dots, n$) при соответствующем её собственном числе λ_k , система $G\varphi = J$ из n уравнений для потенциалов φ становится набором из n скалярных строк $\lambda_k \varphi = J = V^{(k)}$. Такое состояние цепи в [6] было предложено, по примеру теоретической физики, называть базисным.

Сформулируем фундаментальное положение в этой связи.

Теорема 1. Цепь может иметь столько базисных состояний, какова размерность описания её состояний в однородном базисе.

Утверждение следует из сказанного выше о положительной определённости матриц $n \times n$ систем уравнений в однородном базисе (то есть, положительности всех λ_k , являющихся проводимостями $g_{0k} = \lambda_k$ несвязной цепи рис. 2). Такие матрицы обладают полным набором из n собственных взаимортогональных векторов и допускают построение функционала (1), свидетельствующего о реализуемости базисного состояния цепи.

Состояния, отличные от базисных (когда вектор J воздействия на цепь образован $m > 1$ собственными векторами системы) как и в физике, логично называть комбинационными, поскольку их всегда можно представить как линейные комбина-

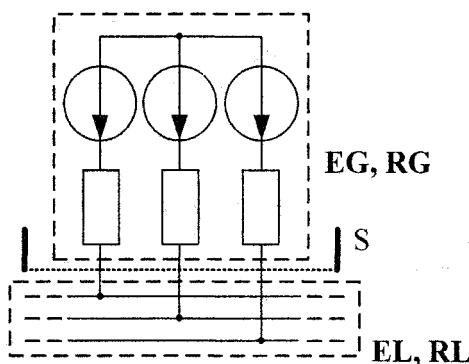


Рис. 1. Пример связи сложных цепей

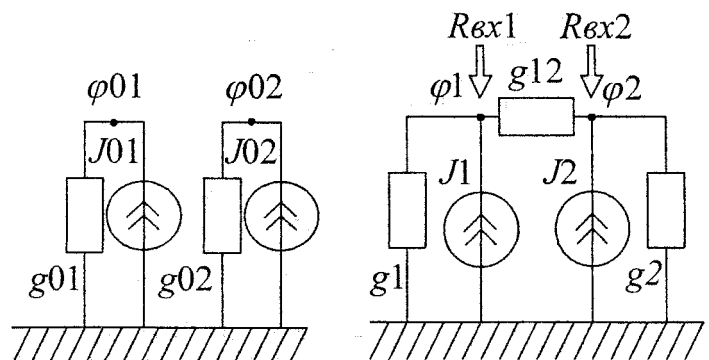


Рис. 2. Преобразование несвязной цепи в связную

ции базисных. Комбинационные состояния, в свою очередь, структурируют на m -мерные ($m < n$) комбинационные и полные или общие, содержащие все n собственных векторов матрицы системы.

Существуют примеры фактически интуитивно применяемых в расчётах электротехники базисных состояний (расчёты симметричных трёхфазных цепей со скалярными сопротивлениями для многопроводной шины, приведение параметров машин к осям р- q и т.п.).

Любая связанная цепь, для которой осуществимо описание состояния в однородном базисе, принадлежит к группе (то есть, к множеству, для объектов которого выполнимы преобразования «туда и обратно»). Описание состояния цепи такой группы суть то или иное ортогональное преобразование некоторого общего для группы описания исходной системы из независимых уравнений для несвязной «порождающей» цепи (рис.2). Столбцы $V^{(k)}$ ортогональной матрицы T ($k = 1, 2, \dots, n$) перехода $G = T \cdot G_0 \cdot T^T$ от матрицы G_0 несвязной цепи к матрице G связанной оказываются собственными векторами G [7]. Матрицы T , таким образом, предопределяют как базисные состояния связанных цепей группы, так и возможные комбинационные.

В частности, для цепи $n=2$ по рис.2 матрица T обязательно окажется матрицей плоского вращения и задаваемый ею тот или иной угол поворота определит направления полуосей эллипса $\varphi^T G \varphi = \text{const}$ состояний φ с одной и той же мощностью PR потерь. Учтя то, что полуоси такого эллипса всегда направлены по собственным векторам $V^{(k)}$ матрицы G , можем установить положения точек $A1$ и $A2$ двух возможных базисных состояний цепи $n=2$ (рис. 3). Например, состояние $A1$ соответствует меньшему $\lambda_1 = \lambda_{\min}$ из двух собственных чисел (длины полуосей обратно пропор-

циональны квадратному корню из собственных чисел).

Плавно следуя по эллипсу $PR = \text{const}$, мы перебираем состояния цепи с одной и той же величиной выделяемой в цепи мощности, но с разными суммами квадратов потенциалов узлов, поскольку расстояние $(\varphi_1^2 + \varphi_2^2)^{0.5}$ от точек до центра эллипса не остаётся при этом постоянным. Легко заметить, что упомянутой выше точке $A1$ соответствует наименьшее отношение $PR / (\varphi_1^2 + \varphi_2^2)$, а точке $A2$ – наибольшее. Эти минимаксные свойства известны в линейной алгебре и резюмированы на случай матриц любой размерности в теореме о так называемом отношении Релея [4]: величина отношения $R(\varphi) = \varphi^T G \varphi / \varphi^T \varphi = \lambda_1$ минимальна и равна наименьшему собственному числу $\lambda_1 = \lambda_{\min}$ тогда, когда вектор φ является собственным вектором матрицы при наименьшем собственном значении λ_{\min} матрицы G ; величина $R(\varphi)$ максимальна и равна наибольшему $\lambda_n = \lambda_{\max}$ тогда, когда вектор φ является собственным вектором матрицы при наибольшем её собственном числе. Учтя это, легко преобразовать всё сказанное в следующее весьма полезное утверждение для цепей.

Теорема 2. При питании цепи от источников тока, вектор которых создаёт на узлах цепи произвольный вектор $|\varphi| = \text{const}$ потенциалов неизменной длины, подаваемая источниками в цепь суммарная мощность P максимальна $P = P_{\max}$ в базисном состоянии, соответствующем наибольшему собственному числу λ_{\max} матрицы проводимостей, и минимальна $P = P_{\min}$ в базисном состоянии, соответствующем наименьшему собственному числу λ_{\min} . В любых других базисных или смешанных

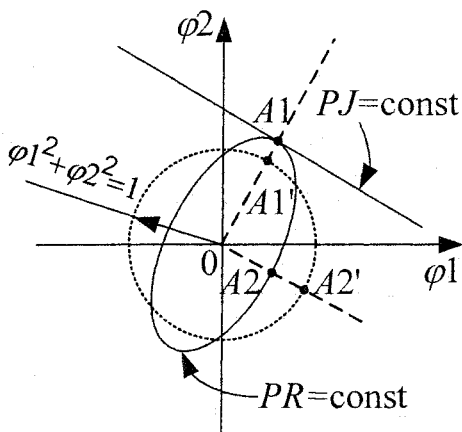


Рис. 3. Точки базисных состояний

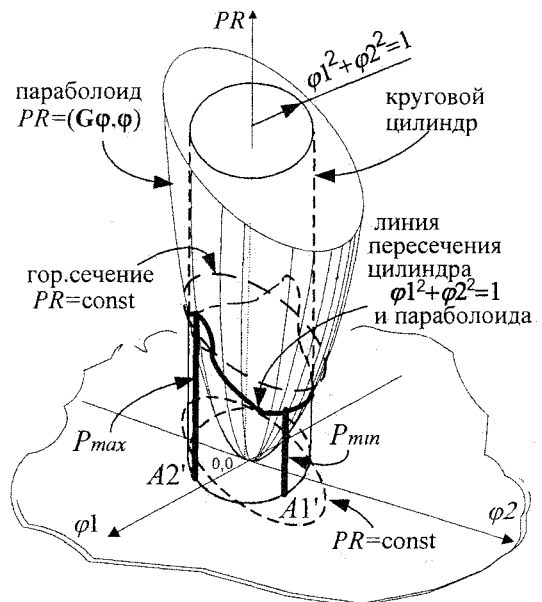


Рис. 4. Параболоид виртуальных потерь и цилиндр

состояниях при том же значении $\varphi = \text{const}$ величина P мощности находится в диапазоне между величинами $P_{\max} > P > P_{\min}$.

При обращении к порождающей несвязной цепи утверждение теоремы 2 легко доказывается аналитически. В самом деле, при $n=2$ (рис.2) и, например, при единичной сумме потенциалов несвязной цепи $\varphi_1^2 + \varphi_2^2 = 1$ справедливо выражение:

$$P = \varphi_1^2 \cdot g_1 + (1 - \varphi_1^2) \cdot g_2. \quad (2)$$

Первая и вторая производные P по φ_1 соответственно равны:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{d\varphi_1} &= 2 \cdot \varphi_1 \cdot g_1 - 2 \cdot \varphi_1 \cdot g_2 = 0; \\ \frac{d^2P}{d\varphi_1^2} &= g_1 - g_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Из (3) следует, что при $\varphi_1=0$ мощность экстремальна и этим экстремумом при $g_1 > g_2$ является минимум – реализовано базисное состояние при наименьшем собственном числе g_2 . При $g_1 < g_2$ и $\varphi_1=0$ экстремумом будет максимум мощности. Отметим, что в этих рассуждениях подразумевается обоснованная в [1] идентичность свойств мощности (функционала F) цепей одной группы.

Ещё более просто понять утверждаемое в теореме 2 при обращении к рис.4, изображающему в трёхмерном пространстве (φ_1, φ_2, P) взаимопересечение поверхности созданных в цепи потенциалов (цилиндр $\varphi_1^2 + \varphi_2^2 = 1$) с поверхностью эллиптического параболоида виртуальных потерь $\varphi^T \mathbf{G} \varphi$ набора резисторов цепи, сечением которого и является эллипс.

Пересечение кругового цилиндра $\varphi_1^2 + \varphi_2^2 = 1 = \text{const}$ с эллиптическим параболоидом $PR = \varphi^T \mathbf{G} \varphi$ виртуальных потерь образует замкнутую траекторию (рис. 4 и рис. 3; точки A_1' и A_2' находятся на образующей цилиндра). Точка максимальной высоты P_{\max} этой траектории обязательно находится на меньшей полуоси, совпадающей с собственным вектором для наибольшего собственного числа. Соответственно, точка минимальной высоты P_{\min} находится на векторе наименьшего собственного числа. Из рис. 4 ясно, что траектория пересечения цилиндра с параболоидом потерь не может иметь ординат более P_{\max} и менее P_{\min} . Мощностям внутри этого диапазона соответствуют либо базисные состояния при промежуточных между наибольшим и наименьшим собственными числами системы (при $n > 2$) однородного базиса, либо комбинационные состояния цепи.

С описанными свойствами базисных состояний цепи непосредственно связано ещё одно весьма полезное положение. Сформулируем его.

Теорема 3. При питании цепи от источников тока, произвольный вектор которых имеет постоянную длину $|\mathbf{J}| = \text{const}$, подаваемая в цепь источ-

никами тока суммарная мощность P максимальна $P = P_{\max}$ в базисном состоянии, соответствующем наименьшему собственному числу матрицы проводимостей, и минимальна $P = P_{\min}$ в базисном состоянии, соответствующем наибольшему собственному числу. В любых других состояниях при этом же значении $|\mathbf{J}| = \text{const}$ величина мощности находится в диапазоне между этими величинами $P_{\max} > P > P_{\min}$.

Доказательство этого утверждения для $n=2$ аналогично выкладкам (2)-(3):

$$P = \frac{J_1^2}{g_1} + \frac{1 - J_1^2}{g_2}, \quad (4)$$

$$\frac{dP}{dJ_1} = \frac{2 \cdot J_1}{g_1} - \frac{2 \cdot J_1}{g_2} = 0,$$

$$\frac{d^2P}{d\varphi_1^2} = \frac{1}{g_1} - \frac{1}{g_2}. \quad (5)$$

Вернёмся к траектории пересечения цилиндра $\varphi_1^2 + \varphi_2^2 = 1$ с эллиптическим параболоидом $PR = \varphi^T \mathbf{G} \varphi$ виртуальных потерь (рис. 4). В числе множества состояний цепи, которым соответствуют точки траектории при $|\varphi|^2 = \text{const}$, находятся и точки, когда ненулевым является только один из токов источников. Такой источник J_s ($1 \leq s \leq n$) создаёт на s -м узле потенциал φ_s , прямо пропорциональный входному сопротивлению $R_{\text{ex} s}$ цепи со стороны данного узла $\varphi_s = J_s \cdot R_{\text{ex} s}$. При этом мощность $P_s = \varphi_s^2 / R_{\text{ex} s}$, вводимая в цепь через этот узел, равна суммарной мощности потерь и должна, по сказанному выше, находиться в диапазоне величин между $P = P_{\min}$ и $P = P_{\max}$ при $\varphi_1^2 + \varphi_2^2 = \text{const}$. То есть, должно быть выполнено неравенство, пределы которого заданы базисными состояниями при $\lambda_1 = \lambda_{\min}$ и при $\lambda_n = \lambda_{\max}$ из чисел матрицы \mathbf{G} :

$$\begin{aligned} \frac{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \dots + \varphi_n^2}{R_{\text{ex} \max}} &= \lambda_{\min} \leq \frac{\varphi_s^2}{R_{\text{ex} s}} = \frac{1}{R_{\text{ex} s}} \leq \lambda_{\max}; \\ \frac{\varphi_s^2}{R_{\text{ex} s}} &= \frac{1}{R_{\text{ex} s}} \leq \lambda_{\max} = \frac{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \dots + \varphi_n^2}{R_{\text{ex} \min}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Неравенствам (6) соответствует следующее утверждение.

Теорема 4. Входная проводимость со стороны любого узла цепи с матрицей проводимостей \mathbf{G} не может быть больше наибольшего собственного числа и меньше наименьшего собственного числа этой матрицы. Равенство входных проводимостей наименьшему или наибольшему собственному числу матрицы \mathbf{G} достигается только тогда, когда матрица \mathbf{G} является диагональной и соответствует несвязной цепи.

Для контурного базиса теорема 4, очевидно, определяет диапазон входных сопротивлений контуров, для набора которых записана матрица \mathbf{R} контурных сопротивлений цепи.

Отметим, что утверждение о переходе неравенства (6) в равенство в теореме 4 основано на том, что матрица несвязной цепи имеет в качестве набора собственных векторов столбцы единичной матрицы. Последняя в этом случае формально и является матрицей T . Питание несвязной цепи от единственного ненулевого источника суть то или иное её базисное состояние.

При оптимизации передачи мощности важную роль играют такие величины, как входные сопротивления цепи. Спектральный подход даёт величину суммы входных сопротивлений цепи со стороны её узлов. Найдём её, ограничившись для простоты фрагментом $n=2$ цепи по рис. 2. Применим произвольную ортогональную матрицу T со столбцами V_1 и V_2 для преобразования диагональной матрицы G_0 проводимостей несвязного фрагмента $n=2$:

$$T \cdot G_0 \cdot T^T = G, \\ G = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{21} \\ V_{12} & V_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} g_{01} & 0 \\ 0 & g_{02} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} \\ V_{21} & V_{22} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Преобразование (7) даст матрицу G проводимостей связной цепи. Наличие собственных векторов V_1 и V_2 позволяет построить проекторы $P_1 = V_1 \cdot V_1^T$ и $P_2 = V_2 \cdot V_2^T$ и с их помощью записать обращение матрицы G в спектральной форме:

$$G^{-1} = \begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{g_{01}} + \\ + \begin{bmatrix} V_{21} \\ V_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{21} & V_{22} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{g_{02}}. \quad (8)$$

Матрицу G^{-1} в форме (8) удобно использовать для расчётов входных сопротивлений цепи. Входное сопротивление R_{ex1} или R_{ex2} со стороны узла равна потенциалу при подаче на него единичного тока в отсутствие других источников. С помощью (8) умножим соответствующие векторы источников $J_1^T = [1 \ 0]$ и $J_2^T = [0 \ 1]$ на G^{-1} и просуммируем затем полученные величины входных сопротивлений $R_{ex1} + R_{ex2}$. Они равны:

$$[G^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}]_1 + [G^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}]_2 = \frac{1}{g_{01}} + \frac{1}{g_{02}}. \quad (9)$$

Поскольку при получении (9) мы не оговаривали свойств V_1 и V_2 помимо их взаимоортогональности, то (9) доказывает инвариантность суммы входных сопротивлений при ортогональных преобразованиях и справедливо следующее утверждение.

Теорема 5. Сумма входных сопротивлений цепи со стороны её узлов инвариантна относительно ортогональных преобразований матрицы проводимостей и равна сумме обратных величин проводимостей порождающих цепей – сумме обратных величин собственных чисел матрицы проводимостей.

Аналогичное утверждение справедливо для суммы входных проводимостей контуров относительно контурных эдс при ортогональных преобразованиях матрицы контурных сопротивлений.

Отметим, что для несвязной цепи равенство суммы проводимостей резисторов сумме обратных величин входных сопротивлений цепи очевидно. С другой стороны, эта сумма проводимостей равна следу диагональной матрицы несвязной цепи, который, как известно ([1] и др.), инвариантен относительно ортогональных преобразований. Отметим также, что теорема 5, кроме задач согласования, может оказаться полезной и при экспериментальном определении собственных чисел произвольной цепи.

На практике абстрактная возможность для цепи с n узлами или n контурами находиться в том или ином базисном состоянии означает питание от n -мерного источника. Последнее в случае сложной цепи представляется весьма экзотическим случаем. Однако все приведённые выше утверждения при наличии в цепи M источников при $M < n$, можно отнести к многополюснику, эквивалентному по M входам заданной n -мерной цепи и полученному преобразованиями цепи к M зажимам источников. Матрицы GA или RA размером $M \times M$, описывающие в этом случае узловые проводимости или контурные сопротивления такого многополюсника, назовём актуальными или эквивалентными матрицами цепи. Хотя для эквивалентного приведения уравнений состояния к размерности $M < n$ можно пользоваться любым методом, проще всего это выполнить шагами прямого хода метода Гаусса, выполняя их как умножения на элементарные N -матрицы [1].

Литература

1. Грамм, М.И. Ортогональные преобразования и многомерное согласование/ М.И. Грамм// *Электричество*. – 2004. – №8.
2. Пенфилд, П. Энергетическая теория электрических цепей/ П. Пенфилд, Р. Спенс, С. Доинкер. – М.: Энергия, 1974.
3. Бутырин, П.А. Диагностика электрических цепей по частям/ П.А. Бутырин, Т.А. Васьковская. – М.: МЭИ, 2003.
4. Икрамов, Х.Д. Численные методы для симметричных систем/ Х.Д. Икрамов. – М.: Наука, 1988.
5. Грамм, М.И. О принципе минимума потерь/ М.И. Грамм// *Изв. вузов. – Электромеханика*. – 1989. – №10.
6. Грамм, М.И. Практические методы численных расчётов для электротехники и электрофизики/ М.И. Грамм. – Челябинск.: ЧГТУ, 1994.
7. Грамм, М.И. Множество цепей с постоянной мгновенной мощностью и экстремальные принципы для цепей/ М.И. Грамм// *Электричество*. – 2003. – №4.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

УДК 681.514+614.8

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА И ПРОИЗВОДСТВЕННО-ОБУСЛОВЛЕННОЙ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ РАБОЧИХ КОЛЛЕКТИВОВ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ЦЕПЕЙ

Р.Х. Юсупов (г. Москва, МГАУ), Ю.Г. Горшков, А.В. Зайнишев (г. Челябинск, ЧГАУ)

В статье рассматривается способ математического моделирования производственного коллектива на основе теории информационных цепей для исследования и оценки показателей производственного травматизма и профессионально-обусловленной заболеваемости.

Состояние производственного травматизма и профессионально-обусловленной заболеваемости в энергетике и других отраслях промышленности приводит к необходимости совершенствования известных и разработки новых, более эффективных методов и технических средства обеспечения безопасности труда на основе изучения закономерностей технологических, трудовых и естественно-производственных процессов.

Современные производственные объекты представляют собой сложные динамические системы со случайным характером большинства входных воздействий. Выходные переменные, к которым относятся и показатели безопасности труда, являются, как правило, случайными процессами и полями [1–3]. Последнее недостаточно учитывается в современной методологии управления безопасностью труда. Существующие модели и алгоритмы для прогнозирования несчастных случаев не дают описания механизма снижения или устранения вероятности травмирования. Известные методики оценки эффективности трудовой деятельности, прогнозирования травматизма и средства его предупреждения [2, 3] разрабатываются параллельно и взаимно между собой не увязаны, что объясняет крайне низкий социально-экономический эффект от затрат на предупреждение травматизма.

Повышение безопасности участников трудового процесса может быть обеспечено систематизацией методов и средств, полученных идентификацией вероятностных моделей функционирования технологических и социальных систем. В этом случае методология обеспечения безопасности основывается на анализе частотных характеристик технологических и социальных процессов и их динамическом синтезе по критериям безопасности. Полученные таким образом параметры технологических и социальных процессов являются научно обоснованным исходным материалом для разработки методов и средств повышения безопасности участников трудового процесса.

Любая статистическая информация по произ-

водственному травматизму предполагает рассмотрение не отдельных участников трудового процесса, а производственных (рабочих) коллективов, состоящих из n -го количества работников. При этом число n может меняться от 2–3 человек до нескольких тысяч. Современные рабочие коллективы, состоящие из специалистов разного возраста, социального уровня и образования, представляют собой сложные социальные системы [4]. Это позволяет говорить о необходимости создания теоретических методов исследования и прогнозирования динамических свойств таких систем, в том числе производственного травматизма и производственно-обусловленной заболеваемости. По нашему мнению в настоящее время сложились условия для разработки теоретического подхода, базирующегося на достижениях теории информационных цепей и теории нечетких множеств. При этом обеспечивается универсальность теоретических методов, простота, доступность и наглядность.

Математическая модель объекта представляет собой совокупность уравнений динамики отдельных составляющих рабочего коллектива в процессе работы. Методика исследования подобных процессов в таких отраслях, как механизация и автоматизация сельскохозяйственного производства, подробно представлена в работах [5–8]. Эти методы, при определенных допущениях, дают широкие возможности для всестороннего исследования динамических свойств социальных систем.

При разработке рабочей гипотезы о низкочастотном характере внешних факторов, воздействующих на рабочий коллектив, на наш взгляд, правомочно использование методики, представленной в работах [7, 8]. Процесс носит случайный характер и соответствует нормальному закону распределения [1], плотность распределения вероятностей которого описывается выражением [9]:

$$f(x) = (\sigma_x \sqrt{2\pi})^{-1} \exp[-(x - \bar{X})^2 / (2\sigma_x^2)], \quad (1)$$

где \bar{X} , σ_x и σ_x^2 – среднее значение, стандарт и дисперсия случайной величины X .

В нашем случае входными переменными бу-

дуть являются факторы производственной среды, то есть факторы, приводящие к профессиональной заболеваемости и травматизму, а также информационно-обучающие потоки и совокупность защитных средств (в том числе средств индивидуальной защиты), а выходными – производственный травматизм и профессионально-обусловленная заболеваемость.

В общем виде математические ожидания выходных показателей [7]:

$$M(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\varphi(x)dx, \quad (2)$$

где $f(x)$ – функция, устанавливаемая при аппроксимации кривой, описывающей зависимость производственного травматизма и производственно-обусловленной заболеваемости от входного параметра; $\varphi(x)$ – плотность распределения вероятностей аргумента x .

При выборе рациональных параметров и состава коллектива, формировании «эталонных» или «оптимальных» характеристик травматизма и производственно-обусловленной заболеваемости целесообразно математическое моделирование. С его помощью возможен поиск причин, вызывающих отклонение реальных характеристик от «эталонных», выявление предельных возможностей коллектива и поиск путей его модернизации.

Методика моделирования опирается на упоминавшийся выше подход, основанный на формировании схем замещения объектов на основе теории информационных цепей. Под информационной цепью будем подразумевать совокупность источников и носителей информационных потоков, составляющих динамическую систему и взаимосвязанных по факторам, возникающим в результате внешнего воздействия [10]. Методика позволяет определять передаточные функции динамических систем по схемам замещения, а их динамические свойства исследовать на основе анализа амплитудно-частотных характеристик входных и выходных параметров. При этом методика учитывает вероятностный характер внешнего влияния.

Рабочий коллектив – система, которая может рассматриваться как некоторая структурированная среда, включающая управляющие подсистемы. В ряде случаев она имеет разветвленный характер, вследствие чего отмечается взаимное влияние друг на друга отдельных ее подсистем. Все это находит отражение в характере протекания динамических процессов в исследуемой системе. В частности, отмечается возможность неустойчивости исследуемой системы.

Чтобы учесть случайные факторы при обосновании малоопасных режимов работы коллектива в процессе выполнения технологических операций, необходимо установить вероятностно-статистические оценки показателей – математические ожидания $M(y)$, дисперсии $D(y)$, стандарты

σ_y , коэффициенты вариации v_y , а также некоторые другие количественные характеристики.

При установлении вероятностно-статистических оценок выходных параметров применяется метод функций случайных аргументов. Его сущность состоит в том, что коллектив рассматривается в виде модели «вход – выход». Входная x_i и выходная y_i переменные величины определяются детерминированной (неслучайной) функциональной зависимостью $y_i = f(x_i)$. В качестве функций связи применяются функции, полученные при аппроксимации кривых, полученных после статистической обработки данных о состоянии производственного травматизма и производственно-обусловленной заболеваемости на исследуемом предприятии. При исследовании динамических процессов в качестве функции связи рассматривается передаточная функция $W(s)$.

Входная величина x , представляет собой случайную величину – «факторы производственной среды», подчиняющуюся арксинусному закону распределения:

$$\varphi(x) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sqrt{A_x^2 - (x - \bar{x})^2}}, & \text{при } (x - \bar{x}) < A_x; \\ 0 & \text{при } (x - \bar{x}) \geq A_x \end{cases}, \quad (3)$$


где $x = \bar{x} + A_x \sin(2\pi f_0 t + \theta_k)$ – входной показатель, аппроксимируемый уравнением синусоиды; f_0 – частота колебаний входной величины; θ_k – случайная начальная фаза; \bar{x} – среднее значение входной величины; A_x – амплитуда входной величины.

Арксинусный закон предполагает рассмотрение гармонического сигнала со случайной начальной фазой с равномерным распределением.


Таким образом, для основных оценок показателей травматизма с учетом вероятностного характера внешних воздействий необходимо установить функцию связи $f(x)$ (передаточную функцию $W(s)$) и закон распределения аргумента $\varphi(x)$. На наш взгляд, помочь в этом может использование метода информационных цепей [10].


Метод основан на формировании эквивалентной схемы замещения объекта, представляющей собой его топологическое отображение в виде определенным образом связанной совокупности условных обозначений ее элементов. Причем в схему включаются те элементы, которые оказывают существенное влияние на решение задачи.

Рабочий коллектив – система, которая может рассматриваться как некоторая структурированная среда, включающая управляющие подсистемы. В большинстве элементов можно выделить три типа простейших элементов – носителей энергии (при построении эквивалентных схем используют условные обозначения, принятые в электротехнике):

1.  – элементы, в которых происходят необратимые потери (диссипация) информационной энергии;

Научно-методические вопросы

2.  – элементы, обладающие способностью накапливать информационную потенциальную энергию;

3.  – элементы, обладающие способностью накапливать информационную кинетическую энергию.

Сочетанием этих простейших элементов может быть получена схема замещения сложной информационной цепи. При построении схемы замещения информационной цепи объекта необходимо исходить из того, что любая его подсистема может быть отображена в виде элементарного блока, представляющего собой определенным образом связанную совокупность элементов, способных как накапливать энергию (потенциальную или кинетическую), так и необратимо ее рассеивать [11] (рис. 1).

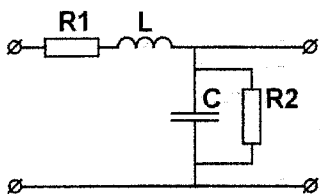


Рис. 1. Схема замещения элементарного блока информационной цепи

Природа последних различна: один из них характеризует потери информации во время обучения (особенность человеческой психики не воспринимать все 100 % входящей информации), а другой – потери информации с течением времени (долговременная память человека постепенно теряет накопленную информацию).

На входе в рабочий коллектив действуют факторы производственной среды – травмообразующие факторы и факторы, приводящие к профессиональной заболеваемости (с учетом того, что по данным медиков 50 % заболеваний так или иначе вызваны производственной деятельностью человека [12]).

Согласно ГОСТ 12.0.003–74 опасные и вредные производственные факторы по природе воздействия подразделяются на четыре вида (рис. 2).

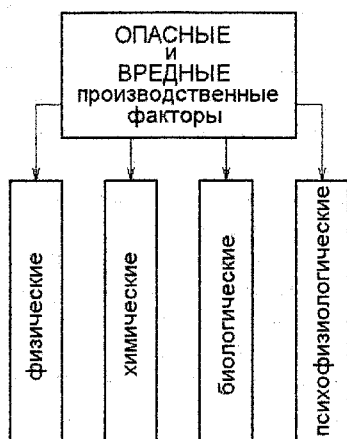


Рис. 2. Опасные и вредные производственные факторы

Принимая данные факторы как вероятностно-статистические процессы, считаем необходимым разделить их на «А» – «аналоговые» (уровень освещенности рабочих мест, температура воздуха, относительная влажность, скорость движения воздушных масс и т.д.) и на «D» – «дискретные» (наличие или отсутствие заземления, защитных кожухов на электроприводах, крышек люков в полу и т.д.). К дискретным факторам можно отнести и наличие или отсутствие того или иного средства индивидуальной защиты.

«Аналоговость» процесса можно обосновать соображением о непрерывном изменении исследуемой величины с течением времени, т.е. связать физическую величину и время некой функцией:

$$A = f(t), \quad (4)$$

где A – величина аналогового фактора (уровень освещенности рабочих мест, температура воздуха и т.д.); t – время (например, часы рабочей смены или дни года).

Величина той же освещенности рабочих мест обосновывается требованиями СНиПов и ГОСТов, поэтому в больших пределах меняться она не может – соответственно все изменения незначительно варьируются с течением времени вокруг математического ожидания величины, определенной требованиями нормативно-технической документации. На рис. 3 представлена зависимость изменения освещенности рабочего места оператора в течение нескольких суток (при условии, что в данном помещении отсутствует естественная освещенность). Требуется обеспечить нормативную освещенность $E_{V\text{НОРМ}} = 300$ лк. График представляет собой одну из реализаций процесса изменения освещенности в анализируемом интервале времени.

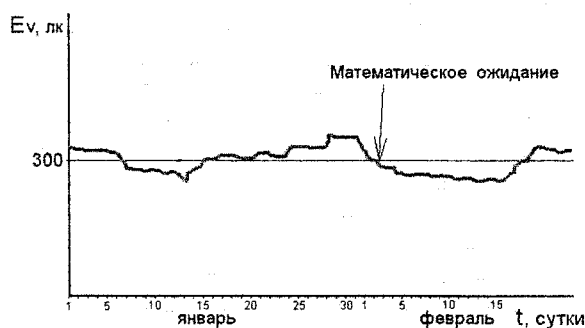


Рис. 3. График изменения освещенности рабочего места оператора

Подобные графики можно составить практически для любого аналогового фактора (рис. 4). Полученный для величин $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ суммарный (эквивалентный) сигнал (рис. 5) можно рассматривать как входной аналоговый.

Большую сложность представляют для исследования дискретные факторы. Для упрощения можно обозначить присутствие того или иного устройства безопасности или средства труда как

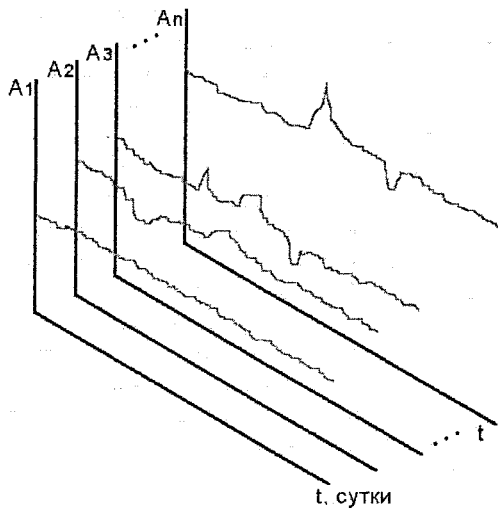


Рис. 4. Графики изменения аналоговых факторов с течением времени

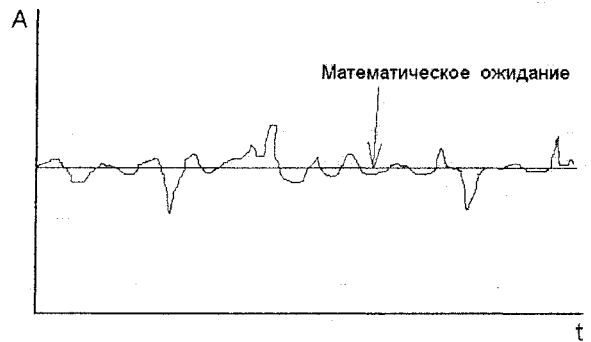


Рис. 5. Эквивалентный сигнал изменения аналоговых факторов производственной среды с течением времени

«единицу», отсутствие – как «ноль». В таком случае величина (амплитуда) сигнала с течением времени (рабочей смены) не меняется, однако на другой день ситуация может измениться (рис. 6). Как видно из графика, в начале года защитный кожух электропривода открыт, но затем он закрывается (на несколько дней). Так же можно проследить динамику использования любого средства либо объекта (рис. 7). Например, в рассматриваемый день может быть восстановлено заземление или

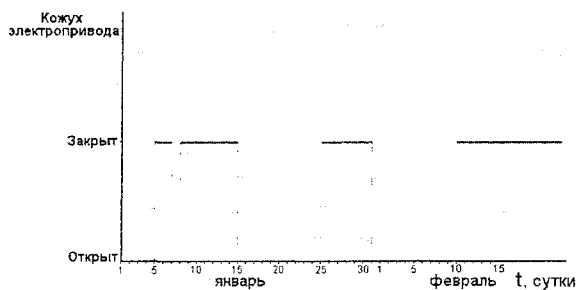


Рис. 6. График изменения состояния кожуха электропривода

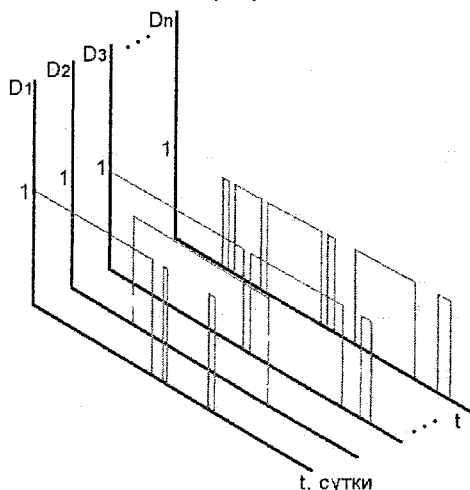


Рис. 7. Графики изменения дискретных факторов с течением времени

может появиться отсутствующий огнетушитель (накануне величина данных факторов была равна «нулю»), но может одновременно оказаться не закрытым люк в полу (который до этого был закрыт – накануне величина данного фактора была равна «единице»), либо не использован респиратор (которым рабочий накануне пользовался, а при отсутствии контроля со стороны непосредственного начальника поленился).

Сложность исследования данного процесса в том, что для анализа случайного процесса необходимо использовать процедуру частотного демодулирования – амплитуда всех «столбиков», представляющих каждый тот или иной фактор безопасности, неизменна, но частотная плотность меняется с течением времени. На рис. 8 представлен суммарный график импульсных факторов. В случае же с аналоговыми процессами для эквивалентного сигнала используются методы анализа случайных процессов [9].

Необходимо отметить, что аналоговые факторы в основном приводят к развитию профессиональных заболеваний (например, высокая влажность при низкой температуре воздуха приводит к хроническому воспалению верхних дыхательных

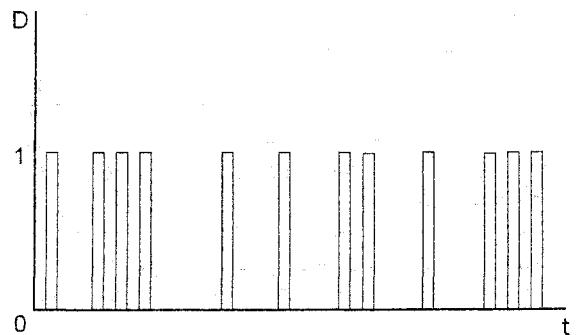


Рис. 8. Эквивалентный сигнал изменения дискретных факторов производственной среды с течением времени

путей), а дискретные – к травмам (отсутствие заземления может вызвать электротравму, отсутствие защитного кожуха электропривода – ампутацию конечности). Тем не менее, нельзя полностью разделять эти два потока – некоторые аналоговые входные воздействия могут приводить к травмам (например, низкая освещенность), а дискретные – к профессиональным заболеваниям (например, отсутствие вентиляционных люков). При этом можно оценить коэффициент взаимной корреляции между этими двумя потоками.

Кроме факторов производственной среды и защитных средств в систему входит обучающая информация (лекционные занятия при проведении повышения квалификации, самостоятельные занятия в системе самообразования, а также инструктажи – повторные, целевые и внеплановые).

Входная информация поступает в производственный коллектив, который можно представить в виде эквивалентной схемы замещения (рис. 9).

Диссипативный элемент $R1$ – резистор, в котором необратимо теряется часть поступающей информации. Влияние на данный процесс могут оказывать факторы окружающей среды – всякое отклонение от их нормативных параметров приводит к потере части информации.

Индуктивный элемент $L1$ – накопитель кинетической энергии потока информации – можно представить как сопротивление входному потоку информации, зависящее от интенсивности ее подачи. Считаем уместным представлять данный элемент как нелинейную индуктивность, обладающую способностью к насыщению. При частых инструктажах потребитель информации находится в области насыщения, проводимость индуктивного элемента снижается и информационный КПД системы «источник информации – потребитель информации» резко падает.

Далее информация откладывается в долговременной памяти человека – емкостном элементе $C1$, накапливающем потенциальную энергию потока знаний. С течением времени накопленная информация теряется – конденсатор шунтируется резистором $R2$, проводимость которого колеблется в значительных пределах, в том числе в зависимости от возраста отдельного человека или среднего возраста работников коллектива. В дальнейших исследованиях необходимо обосновать оптимальную периодичность как проверки знаний, так и проведения инструктажей и повышения квалификации, учитывая величину эквивалентного сопротивления данного диссипативного элемента.

Как указывалось выше, любой рабочий коллектив – это сложная система, которая может рассматриваться как некоторая структурированная среда, включающая управляющие подсистемы. В ряде случаев она может иметь разветвленный ха-

рактер. На рис. 9 представлена эквивалентная схема замещения коллектива в общем виде, где параллельные ветви будем именовать цехами (от a до m), а последовательно включенные блоки – подразделениями (от 1 до n).

На выходе системы появляются два случайных процесса – производственный травматизм и профессионально-обусловленная заболеваемость. В данном случае оба процесса носят аналоговый характер, что облегчает их перевод в частотную форму для дальнейших исследований.

Таким образом, на входе в систему действуют три фактора – обучающая информация (в том числе инструктажи), защитные средства и факторы производственной среды. На выходе системы – производственный травматизм и производственно-обусловленная заболеваемость. Выдвигается гипотеза о том, что, изменяя параметры одного из входных факторов – обучающей информации, можно добиться снижения величин производственного травматизма и производственно-обусловленной заболеваемости. Параметрами, на которые можно влиять в процессе производственной деятельности коллектива, являются частота проведения и объем повторных инструктажей. Данные параметры должны быть представлены в виде частотных характеристик. В условиях случайного характера входного сигнала (обучающей информации), такой характеристикой является спектральная плотность процессов, которая может быть получена в результате обработки статистических данных о периодичности и объеме инструктажей, проводимых на предприятии. На выходе системы будем рассматривать спектральную плотность процесса травматизма и производственно-обусловленной заболеваемости, которая так же может быть получена в результате обработки статистических данных. Спектральные плотности процессов на входе $S(\omega)_{ВХ}$ и выходе $S(\omega)_{ВЫХ}$ производственного коллектива как динамической системы связаны соотношением [8]:

$$S(\omega)_{ВЫХ} = |W(j\omega)|^2 S(\omega)_{ВХ}, \quad (5)$$

где $|W(j\omega)|$ – модуль комплексной передаточной функции производственного коллектива как динамической системы.

В дальнейших исследованиях можно определить периодичность проведения и объем повторных инструктажей, при которых производственный травматизм и производственно-обусловленная заболеваемость работников предприятия будут минимальны. Проблема заключается в определении численных величин элементов эквивалентной схемы замещения и идентификации передаточной функции и функции связи. Для этих целей предполагается в числе других методов задействовать математический аппарат теории нечетких множеств [2].

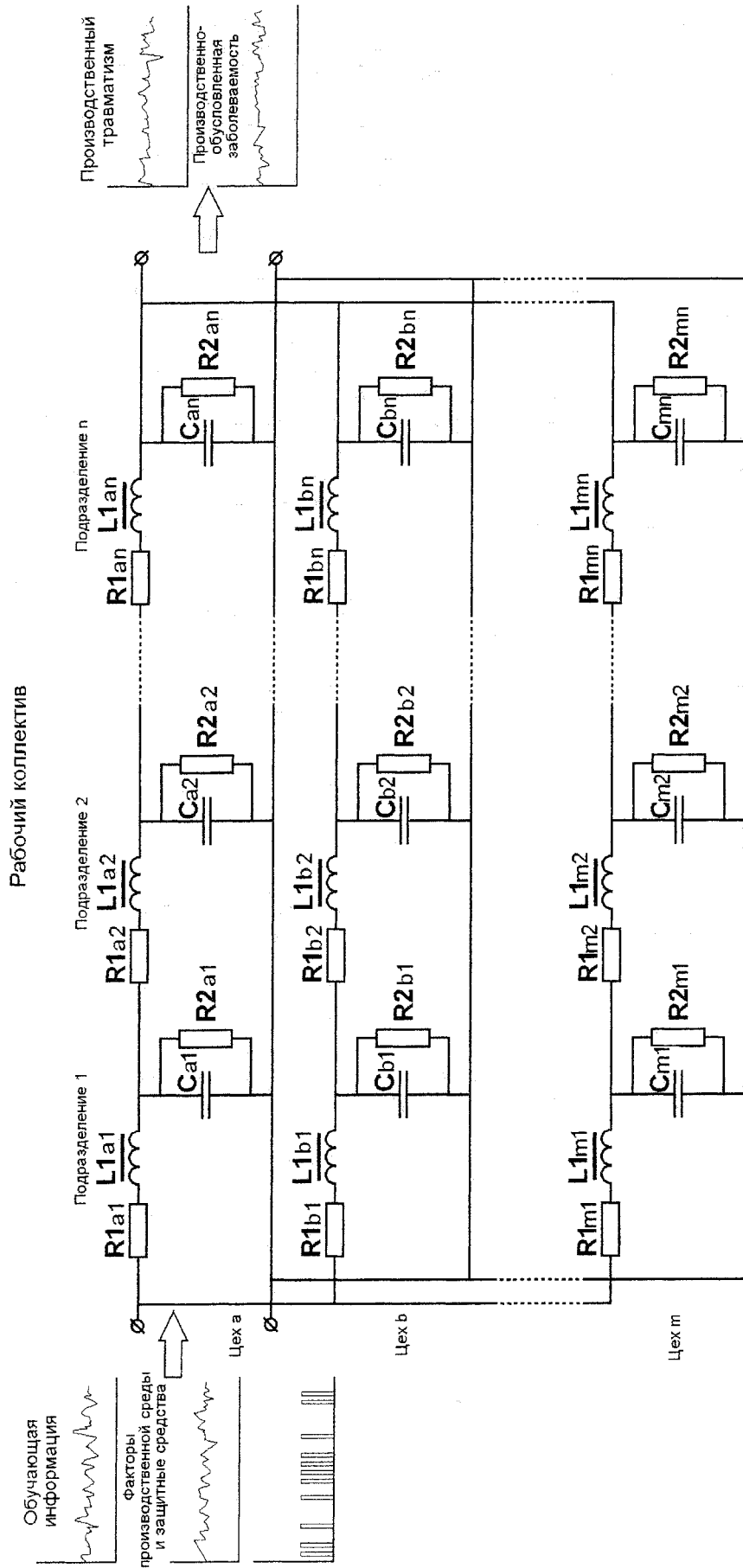


Рис. 9. Эквивалентная схема замещения производственного коллектива как динамической системы в общем виде

Литература

1. Чепелев, Н.И. Методы и технические средства повышения безопасности операторов при технологических отказах сельскохозяйственной техники: Автореф. дис. ... докт. техн. наук/ Н.И. Чепелев. – Красноярск, 2004. – 33 с.
2. Номоконова, О.В. Применение нечетких множеств в оценке и прогнозировании опасных ситуаций: Автореф. дис. ... канд. техн. наук/ О.В. Номоконова. – Челябинск, 2003. – 19 с.
3. Спиридонова, Е.В. Разработка системы аттестации по электробезопасности персонала электроустановок: Автореф. дис. ... канд. техн. наук/ Е.В. Спиридонова. – Челябинск, 2004. – 18 с.
4. Жабреев, В.С. Элементы теории больших систем (теория информационных цепей в управлении): учебное пособие / В.С. Жабреев, И.А. Рыжкова, К.В. Федяев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – 88 с.
5. Шитилевский, Г.Б. Создание единой математической модели МТА/ Г.Б. Шитилевский// Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2000. – № 3. – С. 17–19
6. Банах, Л.Я. Методы разделения движения при упрощении динамических систем / Л.Я. Банах // Виброзащита человека-оператора и колебания в машинах. – М., 1977 – С. 331–335.
7. Агеев, Л.Е. Сверхмощные тракторы сельскохозяйственного назначения / Л.Е. Агеев, В.С. Шкрабак, В.Ю. Моргулис-Якушев. – Л.: Агропромиздат. Ленинградское отделение, 1986. – 415 с.
8. Юсупов, Р.Х. Повышение эффективности функционирования машинно-тракторного агрегата за счет совершенствования статических и динамических характеристик его энергетической части: Автореф. дис. ... докт. техн. наук/ Р.Х. Юсупов – С.-Петербург, 1993. – 37 с.
9. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов / Е.С. Вентцель. – 5-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 1998. – 576 с.
10. Денисов, А.А. Теория больших систем управления: учебное пособие для вузов/ А.А. Денисов, Д.Н. Колесников. – Л.: Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1982.
11. Юсупов, Р.Х. К вопросу моделирования информационных систем / Р.Х. Юсупов, А.В. Зайнишев// Труды XXV Российской школы по проблемам науки и технологий, посвященной 60-летию Победы. – Уральское отделение РАН, Екатеринбург, 2005. – С. 260–262.
12. Безопасность жизнедеятельности: Безопасность труда: учебное пособие/ М.А. Пережогин, Ю.Г. Горшков, С.В. Чернышев и др., под общ. ред. М.А. Пережогина. – Челябинск, 1996.

Юсупов Рамазан Хабибрахманович – Московский государственный агроинженерный университет, профессор кафедры «Системы управления», доктор техн. наук.

Горшков Юрий Германович – Челябинский государственный агроинженерный университет, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности, доктор техн. наук, профессор.

Зайнишев Альфред Варисович – Челябинский государственный агроинженерный университет, кафедра безопасности жизнедеятельности, канд. техн. наук, доцент.

**ВЕСТНИК
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

№ 20 (92) 2007

**Серия
«ЭНЕРГЕТИКА»
Выпуск 8**

Издательство Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 26.09.2007 Формат 60×84 1/8. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 6,97. Уч.-изд. л. 7,5. Тираж 500 экз. Заказ 354/69.

Отпечатано в типографии издательства ЮУрГУ. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.