

Интеллектуализация процесса поддержки принятия решений при эксплуатации энергетических котельных установок

Н.И. Хорошев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, пр. Комсомольский 29, Пермь, Россия

nikolay.khoroshev@gmail.com

Статья поступила 9.04.2017, принята 24.04.2017

В статье рассмотрены вопросы повышения эффективности работы энергетических котельных установок как ответственных элементов генерации тепловой энергии для производственных нужд. В основу метода научных исследований положены аппарат искусственных нейронных сетей и кластерный анализ, позволяющие работать с большими объемами разнородной технической информации. В ходе исследований разработан алгоритм интеллектуального анализа данных, содержащий аспекты реализации параллельных вычислений и адаптивного кластерного анализа для более глубокого понимания факторов повышения производительности оборудования. Осуществлена параметрическая формализация паровых котлов, для которых синтезирована искусственная нейронная сеть. В результате апробации предлагаемых решений на реальном объекте выявлены потери тепловой энергии при ее подаче от котлов ДЕ на гофроагрегаты, что явно прослеживалось при уменьшении среднесуточной температуры окружающего воздуха. Установлено, что удельные показатели выработки пара на единицу произведенной продукции и расхода природного газа при генерации единицы пара могут существенно отличаться для одной и той же энергетической установки, поскольку первый фактор связан в большей степени с производительностью гофроагрегатов, а второй — с производительностью котлов. Факторы, связанные с работой гофроагрегатов и котлов, требуют организации автоматизированного сбора, контроля и учета всей технической информации. В ходе расширенного анализа данных на основе предложенной нейронной сети были выявлены диапазоны наилучшей производительности котлов: загрузка должна составлять свыше 50 %, для котла RFB увеличение его загрузки даст наилучший эффект. Показана возможность использования адаптивного кластерного анализа в связке с нейронной сетью. Представленные в работе результаты могут быть использованы как для экспресс-оценки состояния энергетического оборудования, так и для более детального анализа причин его непроизводительной работы на основе расширенного перечня факторов, информация по которым должна быть получена с использованием средств автоматизации.

Ключевые слова: энергетические котельные установки; интеллектуальный анализ данных; нейронные сети; адаптивный кластерный анализ; целлюлозно-бумажная промышленность.

Intellectualization of decision support in the operation of power boiler units

N.I. Khoroshev

Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky Ave., Perm, Russia

nikolay.khoroshev@gmail.com

Received 9.04.2017, accepted 24.04.2017

The article considers the issues of increasing the efficiency of energy boiler plants as responsible elements for generation of thermal energy for production needs. The method of scientific research is based on the apparatus of artificial neural networks and cluster analysis, allowing to work with large volumes of heterogeneous technical information. In the course of the research, the data mining algorithm, containing aspects of parallel calculations realization and the adaptive cluster analysis for deeper understanding of the factors that increase equipment productivity, is developed. Parametric formalization of the steam boilers units, for which an artificial neural network is synthesized, is carried out. As a result of proposed solutions approbation on a real object thermal energy losses were detected when energy supply from DE boilers to corrugated aggregates, which was clearly traced with a decrease in the average daily air temperature. It has been established that the specific production rates of steam per output production unit and consumption of natural gas during generation of a steam unit can differ significantly for the same power generating system, since the first factor is related to the corrugated aggregates productivity, and the second – to the boilers productivity. Factors associated with the operation of corrugated aggregates and boilers require the organization of automated collection, control and accounting of all technical information. During the extended data analysis, based on the proposed neural network, the ranges of the best boiler output were identified: the load should be over 50 %, for the RFB boiler, an increase in its loading would give the best effect. The possibility of using adaptive cluster analysis in conjunction with a neural network is shown. The results presented in work can be used both for an express assessment of the state of power equipment and for more detailed analysis of the reasons for its unproductive work on the basis of an expanded list of factors, information on which has to be obtained with use of automation tools.

Keywords: power boiler units; data mining; neural networks; adaptive cluster analysis; pulp and paper industry.

Введение

В настоящее время для многих промышленных энергоемких предприятий различных отраслей экономики страны характерна ситуация, в которой необходимо проводить модернизацию энергетического оборудования (ЭО), а также проработку математического обеспечения систем поддержки принятия рациональных управленческих решений (СППР) [1–3]. Связано это прежде всего с обеспечением энергетически безопасных и конкурентных условий работы, базирующихся на факторах обновления основных средств с учетом особенностей их амортизации [4] и применения современных технологий рационального использования ресурсного потенциала предприятий [5].

Вопросы эффективного использования тепловой энергии (пара, горячей воды) при ее генерации, распределении и потреблении принимают особое значение во многих производственных системах. При этом ответственными элементами данных систем, как правило, являются энергетические котельные установки (ЭКУ) [6], эффективность работы которых во многом зависит как от их технического состояния, так и способов применения систем обеспечительного характера, позволяющих формировать технологию рационального использования ресурса оборудования при производстве продукции. В этой связи при организации системы технической эксплуатации (СТЭ) ЭО особое значение принимают методы интеллектуального анализа данных (ИАД), используемые при организации интеллектуальных автоматизированных систем (ИАС) поддержки принятия решений (ППР) [1–3; 7–9].

При реализации процедур ИАД как взаимосвязанных элементов СППР может быть использован целый комплекс математических методов: нечеткая логика, деревья решений, эволюционные методы, системы обработки экспертных знаний, искусственные нейронные сети, кластеризация и др. [7–13]. Данные области знаний, безусловно, требуют формализации и проработки (адаптации и совершенствования), в том числе на методическом уровне, с учетом особенностей рассматриваемой предметной области.

В качестве объекта исследования в статье рассматривались ЭКУ целлюлозно-бумажного производства (ЦБП), являющиеся в том числе типовыми элементами для многих предприятий энергоемких отраслей страны.

Для ЦБП одним из ключевых видов ресурсов является тепловая энергия, использование которой сопряжено с работой большого числа машин основного и вспомогательного производств. Установки, генерирующие тепловую энергию, имеют большое значение при производстве плоских слоев картона, гофрокартона, различных видов бумаги и другой продукции. При этом они являются ключевым звеном в основной технологической цепи производства. Повышение эффективности работы таких установок связано с увеличением производительности предприятия в целом и снижением затрат на оплату используемых топливно-энергетических ресурсов (ТЭР).

Постановка цели и задач исследования. Цель исследования заключается в проработке механизма повышения эффективности работы энергетических котельных установок целлюлозно-бумажного производства на основе

применения аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС) и адаптивного кластерного анализа (АКА), обеспечивающих многоаспектный количественный и качественный анализ разнородной технической информации при формировании управленческих решений.

В статье рассматривались следующие задачи: аналитический обзор, обоснование и выбор инструментов ИАД; разработка и описание алгоритма ИАД в области эксплуатации ЭКУ; параметрическая формализация объекта исследования; апробация предлагаемых решений и описание основных результатов исследования.

Аналитический выбор методов исследования. В рамках многоаспектной оценки эффективности работы ЭКУ требуется проводить анализ достаточно разнородной и большой по объему информации. При этом, как правило, сложно однозначно определить закономерность влияния входных параметров на результирующие признаки, характеризующие эффективность работы ЭО, по некоторой одной универсальной аналитической зависимости. Усугубляется данное положение тем, что с течением времени технические и технологические параметры подвержены различным изменениям — отклонениям от базовых значений предыдущих периодов времени. Данный факт обуславливает необходимость применения на практике способа построения многофакторной, параллельно организованной и адаптирующейся [14] к условиям эксплуатации ЭКУ сетевой структуры — модели ИАД.

С учетом многообразия методов ИАД [15] и специфики рассматриваемой предметной области наиболее перспективным является использование аппарата ИНС, позволяющего осуществлять оценку эффективности работы ЭКУ в различные моменты времени, особенно в условиях отсутствия формализованных методов их описания и необходимости проведения быстрых расчетов в изменяющихся условиях работы оборудования.

С целью определения подходящей архитектуры ИНС был проведен анализ возможности использования различных типов сетей (табл. 1): многослойный персептрон (*MLP*); сеть радиального базиса (*RBF*); самоорганизующаяся карта Кохонена (*SOM*); сети Хопфилда и Хэмминга; сеть адаптивного резонанса и др. [13–16].

Таблица 1

Сравнение различных типов ИНС

Решаемая задача на основе сети	Тип ИНС				
	<i>MLP</i>	<i>SOM</i>	<i>HN</i>	<i>RBF</i>	<i>ARN</i>
Прогнозирование	+			+	
Сжатие данных и ассоциативная память	+		+		
Распознавание образов и классификация	+		+	+	+
Оптимизация		+			
Кластеризация	+	+			+
Аппроксимация функции	+			+	
Анализ данных	+	+			
Принятие решений и управление	+			+	

Примечание. Символ «+» означает возможность применения типа ИНС к решению задачи.

Исходя из особенностей применения ИНС (их преимуществ и недостатков) [13–16] и цели научного исследования, была выбрана достаточно универсальная структура — *MLP*, реализующая аппроксимацию и прогнозирование анализируемых параметров ЭКУ [17; 18].

Отметим, что важной составляющей повышения эффективности функционирования ЭО является возможность построения не только модели объекта, но и модели структуры анализируемых данных на основании процедуры адаптивной кластеризации [7], позволяющей определить наличие скрытых зависимостей параметров, подлежащих детальному анализу на по-

следующих этапах функционирования ИАС ППР [15]. Предлагаемый метод может быть полноценно использован на заключительном этапе ИАД в комплексе с предлагаемым аппаратом ИНС.

Разработка алгоритма ИАД. Для оценки эффективности работы ЭКУ на основе аппарата ИНС и АКА разработан и реализован в виде программы на языке Java алгоритм синтеза структуры сети *MLP* и анализа разнородной технической информации, обеспечивающий принятие рациональных управленческих решений (рис. 1).

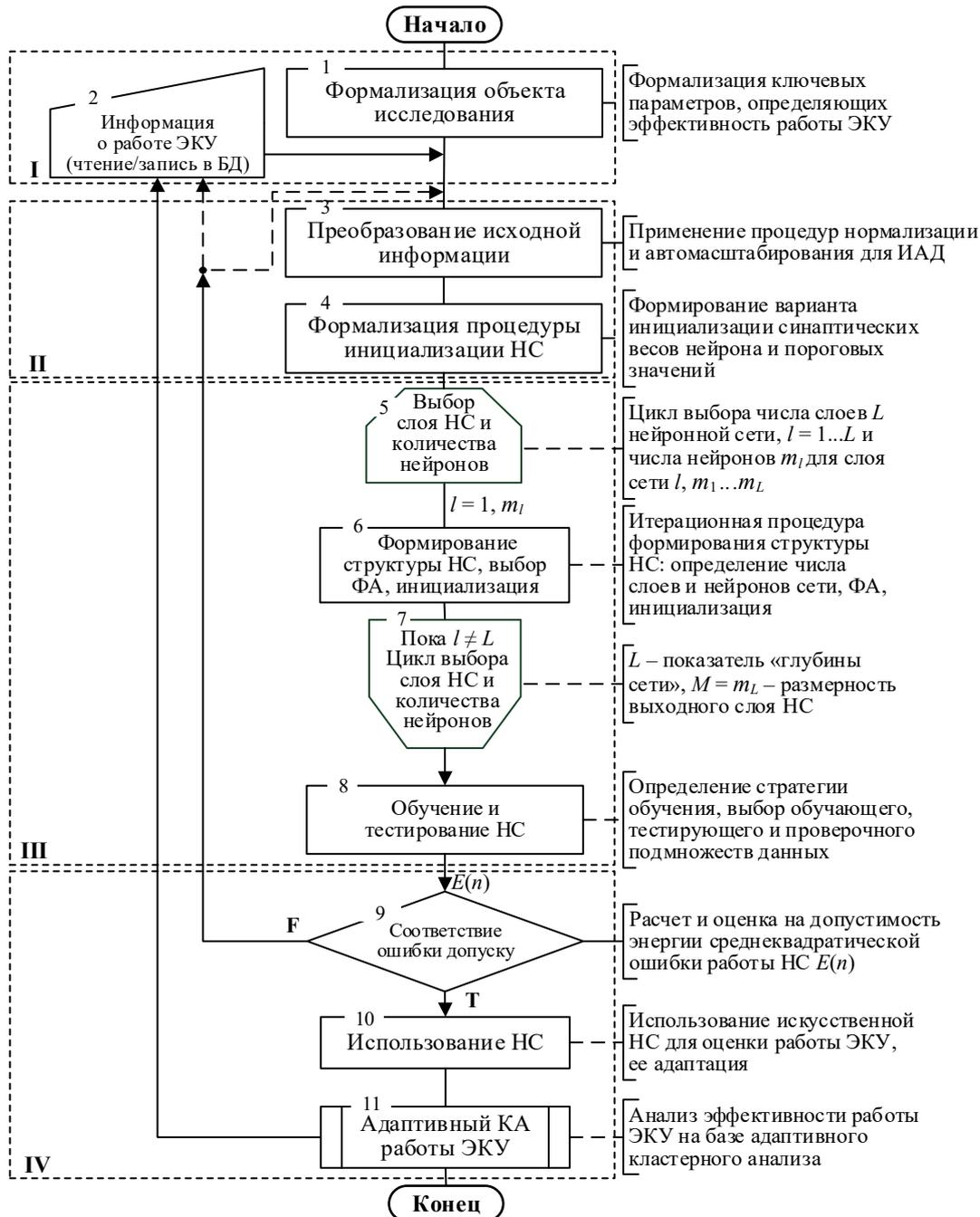


Рис. 1. Алгоритм ИАД в области эксплуатации ЭКУ

Приведем краткое описание основных консолидированных функциональных областей I–IV предложенного алгоритма.

Область I (блоки № 1 и 2, рис. 1) характеризуется параметрической формализацией анализируемых ЭКУ на основании определения ключевых количественных и качественных признаков (входных и выходных параметров будущей модели), а также связана с процедурами записи и извлечения информации о работе ЭО согласно выделенным признакам.

Область II содержит: первичную обработку исходной информации для исключения ошибок выборки из генеральной совокупности изучаемых признаков и ее преобразование на основании процедур нормализации и автоматизирования [7; 15] для построения сети MLP (блок № 3); выбор варианта инициализации весов ИНС и пороговых значений отдельных нейронов (блок № 4).

Функциональная область III алгоритма (блоки № 5–8, рис. 1) связана с итерационной процедурой формирования структуры сети MLP на основании выбора числа слоев L , нейронов в каждом слое m , функций активации (ФА: логистическая, сигмоидальная, гиперболический тангенс, экспоненциальная и др. [13; 14; 16]), которые могут быть заданы в виде ограничений (диапазонов изменений). Данная область также связана с определением стратегии обучения и выбором обучающего, тестирующего и проверочного множеств [16].

Область алгоритма IV (блоки № 9–11, рис. 1) в зависимости от выбора оценочного критерия качества аппроксимации (1)–(3) позволяет: определить допустимость энергии среднеквадратической ошибки работы сети $E_{av}(n)$, коэффициента детерминации (r^2) или средней абсолютной процентной ошибки (MAPE) [1] (блок № 9); использовать ИНС по назначению для аппроксимации данных и их экстраполяции (блок № 10) совместно с вложенной процедурой АКА (блок № 11), формирующей заранее неизвестное число кластеров для анализируемых данных согласно (4) [7; 15].

$$E_{av}(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E(n), \quad E(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in G} e_j^2(n); \quad (1)$$

$$e_j(n) = d_j(n) - o_j(n);$$

$$MAPE(n) = \frac{100}{G} \sum_{j \in G} |e_j(n)| / o_j(n); \quad (2)$$

$$r^2 = D_{об.} / D_{общ.} \quad (3)$$

где N — общее число образов в обучающем множестве (его мощность); $E(n)$ и $e_j(n)$ — сигнал ошибки для нейронов выходного слоя сети и выходного нейрона j соответственно; o_j и d_j — выходной сигнал сети и желаемый отклик соответственно; n — номер итерации; G — множество нейронов выходного слоя сети; $D_{об.}$ — дисперсия, объясняемая моделью (ИНС); $D_{общ.}$ — общая дисперсия [15].

$$CM = \begin{pmatrix} cc_{1,1} & cc_{1,2} & \dots & cc_{1,v} \\ cc_{2,1} & cc_{2,2} & \dots & cc_{2,v} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ cc_{k,1} & cc_{k,2} & \dots & cc_{k,v} \end{pmatrix}, \quad I_{CM} \rightarrow \min_{i=1:k} \left\{ \sum_{j=1}^v cc_{i,j} \right\}, \quad (4)$$

где CC — составной критерий (*Complex Criteria*); v — количество подкритериев, определяющих качество АКА (например, энтропия разбиения, индекс эффективности и др. [7]); CM — матрица подкритериев; k — количество центров кластеров; I_{CM} — индекс строки матрицы CM , определяющий оптимальный вариант числа структур в модели данных и метода кластеризации (например, алгоритм c -средних, нечеткая кластеризация и др.) [15].

Параметрическая формализация ЭКУ и синтез ИНС. Предлагаемый аппарат ИНС и АКА предполагает работу с входными и выходными данными. В этой связи необходимо формализовать параметры применительно к объекту исследования — ЭКУ.

Технологическое оборудование и система отопления производства гофрокартона являются основными потребителями тепловой энергии (пара и горячей воды), которую генерируют ЭКУ парокотельного цеха (ПКЦ). К ЭКУ относятся: два котла марки ДЕ-6,5-14-ГМ-О (ЭКУ № 1, 2) российского производства, один котел Revotherm RFB-50 (ЭКУ № 3) индийской фирмы «Therma».

При разных нагрузках ПКЦ, как показывает практика, ЭКУ могут вести себя по-разному. Например, при малом расходе пара лучшую эффективность показывает первый котел, но когда расход пара большой, второй котел, затрачивая меньшее количество ТЭР, работает производительнее.

Для улучшения условий работы ЭКУ необходимо определять моменты времени, в которые они начинают работать более производительнее, с учетом изменений различных факторов. Для этого предлагается использовать ИАД, содержащий ИНС и АКА как элементы ИАС (рис. 1).

Для более полного понимания и формализации множества анализируемых признаков ЭКУ (входных и выходных параметров ИНС) была построена обобщенная схема тепловой сети гофропроизводства (рис. 3: СО — система отопления, ГВС — горячее водоснабжение, ПКС — пароконденсатная система).

Исходя из представленной схемы (рис. 2), специфики организации производственного процесса и действующей автоматизированной системы сбора технической информации, к входным параметрам вектора X_1 были отнесены (для ЭКУ № 1, 2): $Q_{ПВ1,2}$ — расход питательной воды, m^3 ; $R_{1,2}$ — наличие аварийного события, относящегося к СТЭ (авария, планово-предупредительный ремонт, переключение и др.), *отн. ед.*; T_{01} и $Q_{Г1}$ — наработка ($ч$) и расход газа (m^3) ЭКУ № 1; T_{02} и $Q_{Г2}$ — наработка ($ч$) и расход газа (m^3) ЭКУ № 2.

Входные параметры вектора X_2 содержат (для ЭКУ № 3): T_{03} — наработка, $ч$; $Q_{Г3}$ — расход газа, m^3 ; $Q_{ПВ3}$ — расход питательной воды, m^3 ; R_3 — наличие аварийного события согласно действующей СТЭ, *отн. ед.*

Также были выделены обобщенные входные признаки: M — месяц года; T — среднесуточная температура окружающего воздуха, $^{\circ}C$.

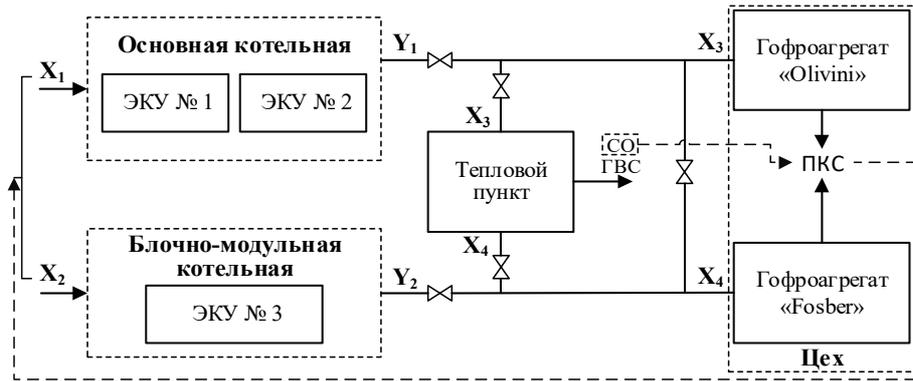


Рис. 2. Обобщенная схема тепловой сети гофропроизводства

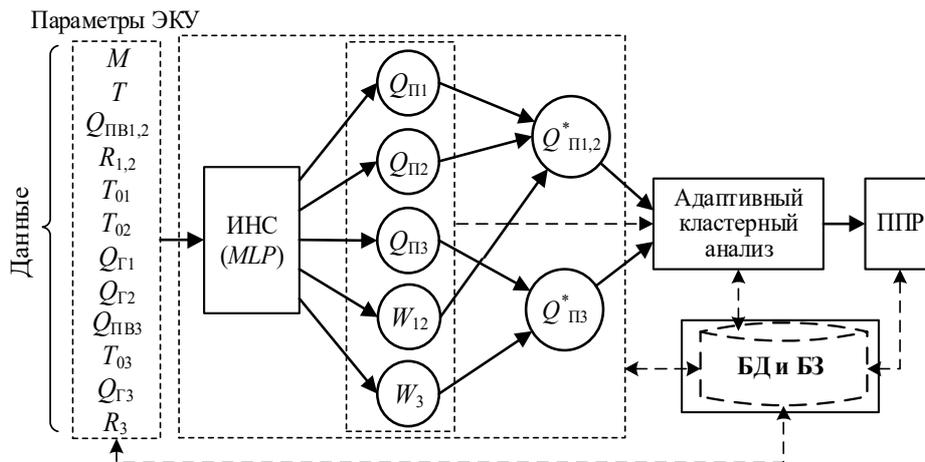


Рис. 3. Обобщенная структура поддержки принятия решений для ЭКУ

В качестве выходных переменных (целей) определены: $Q_{П1}$, $Q_{П2}$ (вектор Y_1) и $Q_{П3}$ (Y_2) — выработка (расход) пара ЭКУ № 1, 2 и 3, m ; W_{12} — суммарная выработка гофроагрегатов (ГА) «Olivini» и «Fosber» от пара ЭКУ № 1, 2 (котлы ДЕ), тыс. m^2 ; W_3 — выработка ГА «Fosber» от ЭКУ № 3 (RFB-50), тыс. m^2 .

Таким образом, обобщенно структура ИНС включает в себя 12 входных и 5 выходных параметров (рис. 3: $Q^*_{П1,2}$ — удельная выработка пара ЭКУ № 1, 2 на m^2 произведенной продукции (гофрокартона) и $Q^*_{П3}$ — удельная выработка пара ЭКУ № 3), векторы X_3 и X_4 принимают параметры Y_1 и Y_2 соответственно (рис. 3). При этом, с учетом технологических особенностей работы тепловой сети и производительности котлов ДЕ-6,5 и RFB-50, следует отметить, что мощности одного парового котла (например, ЭКУ № 3) может не хватить на работу всех ГА при потенциально возможной потребности в 207 т/сутки (данные 2014–2016 гг.).

Вся информация о ходе технологического процесса по генерации тепловой энергии и настроечных параметров ИНС и АКА должны храниться и извлекаться из базы данных параметров (БД) и базы знаний (БЗ) ИАС ППР (рис. 3).

В результате автоматизированного итерационного процесса построения нейросетевой модели согласно предложенному алгоритму (рис. 1) была определена наилучшая структура сети MLP для ЭКУ ПКЦ (табл. 2) [13; 14; 16].

Таблица 2

Основные характеристики синтезированной ИНС для ЭКУ

Характеристика ИНС	Описание
Тип и структура	MLP «12-10-5»: 12 входных нейронов — по числу параметров, 12 скрытых нейронов и 5 выходных нейронов — число целей
Исходные данные	Значения параметров ИНС за 2014–2016 гг. (по суткам): 70 % — обучающее, 15 % — тестирующее и 15 % — проверочное множества (L , T и V). Выбор — случайный
Функции активации	Экспоненциальная — для входного, скрытого слоев; логистическая — для выходного слоя сети
Алгоритм обучения	Обратное распространение ошибки
Инициализация сети	Синаптические веса имеют равномерное распределение (нулевое среднее значение и дисперсия, равная квадратному корню из количества связей нейрона)
Критерии адекватности ИНС	Как основные использовались: $MAPE \approx 8\%$ и $r^2 = \{0.95, 0.93, 0.94\}$ — для множеств L , T и V

Основные результаты исследования. В ходе тестирования ИНС проведен анализ чувствительности входных параметров [16], заключающийся в оценке их влияния на результирующее изменение выходных признаков (целей моделирования). При этом использовались обучающая, тестирующая и проверочная выборки данных за период 2014–2016 гг.

Анализ показал значимость признаков $Q_{Г2}$, $Q_{Г3}$ и $Q_{Г1}$ с учетом наработки ЭКУ, а также M и T , влияние которых косвенно свидетельствует о наличии потерь в тепловой сети предприятия ЦБП (рис. 4: пунктир означает эллипс размаха с доверительной вероятностью 0,95; линия — общий тренд).

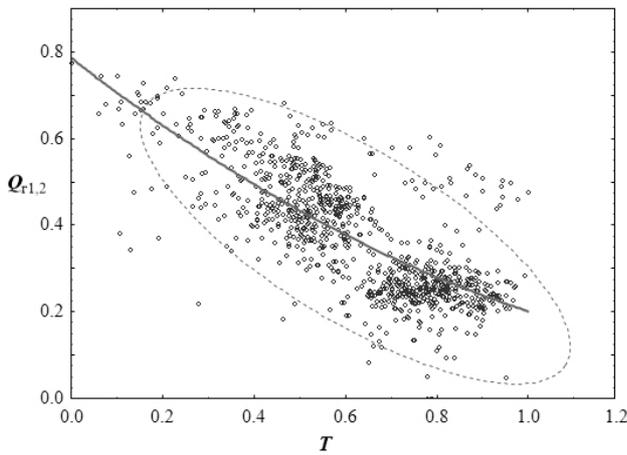
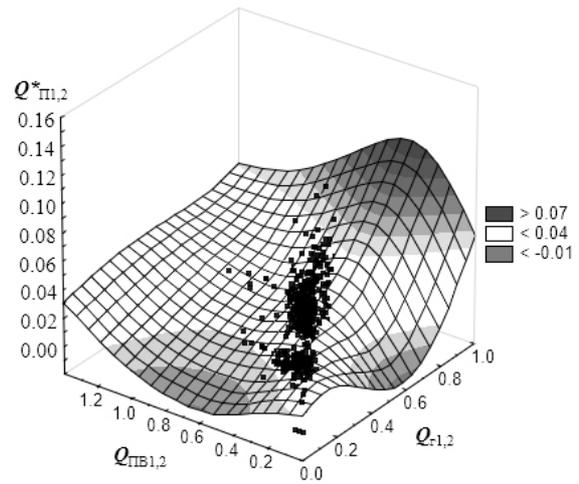


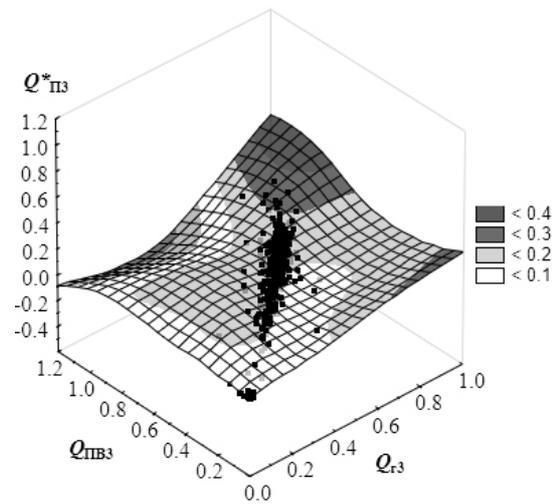
Рис. 4. Зависимость расхода газа ЭКУ № 1, 2 от температуры окружающего воздуха

Далее в ходе работы ИНС на ретроспективных данных был проанализирован параметр расхода пара на м² произведенной продукции (гофрокартона) для ЭКУ ПКЦ ($Q_{П1,2}^*$, $Q_{П2}^*$, рис. 4 и 5) в зависимости от потребления питательной воды $Q_{ПВ}$ и газа $Q_{Г}$. При этом ряд факторов, рассчитываемых применительно к ЭКУ № 1, 2 одновременно, связан с организацией учета потребления ТЭР (например, используется один узел учета) и другими особенностями технологической схемы гофропроизводства.

На рис. 5 явно прослеживаются, во-первых, прямая практически линейная зависимость потребления газа ЭКУ и питательной воды для котлов ДЕ-6.5 и RFB-50 (коэффициент линейной регрессии r для обоих случаев составил 0,87 и 0,98 соответственно), во-вторых, работа котлов ДЕ-6.5 в связке с ГА является более производительной, в-третьих, для ЭКУ № 1, 2 и ЭКУ № 3 параметр $Q_{П}^*$ может повышаться (ухудшаться) от трех до семи раз с ростом расхода газа и питательной воды в системе генерации пара. Данный факт, безусловно, требует проверки (более глубокого исследования) с учетом организации автоматизированного сбора, контроля и учета всей технической информации [18–20]. Кроме того, важным аспектом является формализация в перспективе способа определения выработки продукции гофроагрегатом от пара конкретной единицы котельной установки.



a)



b)

Рис. 5. Удельный расход пара в зависимости от расхода газа и питательной воды: а — для ЭКУ № 1, 2; б — для ЭКУ № 3

На рис. 6 представлены усредненные удельные показатели расхода газа на единицу сгенерированного пара (тонну) для отдельных ЭКУ, которые могут быть вычислены на основании результатов, полученных с выходов ИНС (рис. 3) в режиме моделирования выработки пара и продукции ЦБП.

На графике (рис. 6) месяцы имеют вид ступенчатой функции (M), каждая ступень означает конкретный месяц года, начиная с нулевой отметки (январь, февраль, март и т. д.). Закрашенные области определяют периоды времени работы ЭКУ при отсутствии аварийных остановов, переключений и других событий СТЭ, а также при работе в регламентированном диапазоне производительности котлов (не менее 20 % от номинальных значений согласно паспортным данным), что соответствует использованию в анализе более однородной выборки данных. Анализируя представленные области (в контексте рис. 5 и 6), можно выявить следующие закономерности: производительность ЭКУ № 3 по показателю $Q_{Г}/Q_{П}$ в разные периоды времени являлась наилучшей; производительность котлов

ДЕ 6.5 была несколько хуже, чем для ЭКУ № 3, и примерно одинаковой между собой (с учетом переменной загрузки); все аварийные остановы, ремонты, переключения и другие события СТЭ приходились на весенние месяцы. При этом в ходе расширенного анализа данных на основе ИНС были выявлены диапазоны наилучшей производительности котлов ($Q_r/Q_{П} \rightarrow \min$):

загрузка ЭКУ должна составлять от 50 % и выше, для котла RFB-50 увеличение его загрузки даст наилучший эффект.

На заключительном этапе реализуется процедура адаптивной кластеризации ретроспективных или моделируемых значений параметров (рис. 7).

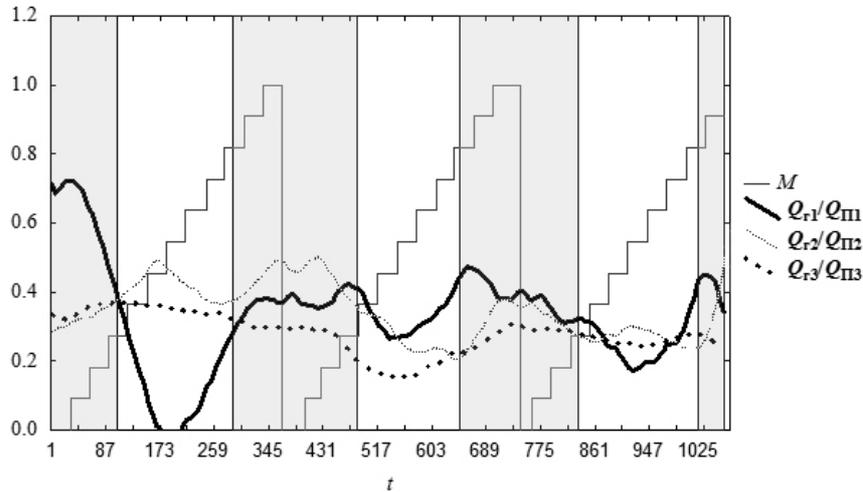


Рис. 6. Показатели эффективности работы ЭКУ

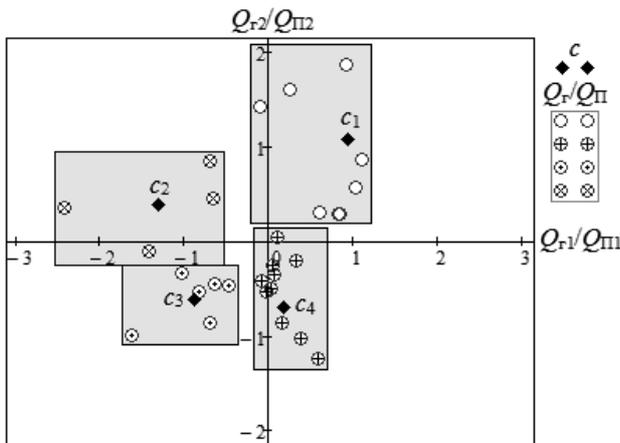


Рис. 7. Пример АКА эффективности ЭКУ № 1, 2

В качестве примера приведена процедура АКА [7], позволяющая выявить зависимость производительности двух котлов ДЕ-6.5 друг от друга за определенный промежуток времени (например, за октябрь месяц 2014 г.). На основе алгоритма кластеризации определено оптимальное число групп данных (кластеров c), равное четырем: $\{c_1, c_2, c_3, c_4\}$. Данный факт свидетельствует о том, что загрузка ЭКУ № 1, 2 может иметь разные зависимости, прямую и обратную, и не связана жестко между собой. Этот факт обуславливается различной загрузкой котлов, а также наличием третьего центра генерации — ЭКУ № 3. Выделенные области можно расположить в порядке ухудшения производительности котлов следующим образом: $\{c_1, c_4, c_2, c_3\}$. Наибольшим приоритетом обладает группа c_1 , другие

группы связаны с пониженной производительностью одного из котлов или обоих сразу (рис. 7), что коррелирует также с параметром температуры (рассматриваемые дни имели наиболее теплую среднесуточную температуру в разрезе месяца).

Заключение

1. Предложен алгоритм интеллектуального анализа данных, содержащий аспекты реализации параллельных вычислений и адаптивного кластерного анализа для более глубокого понимания факторов повышения производительности ЭО.

2. Осуществлена параметрическая формализация паровых котлов, для которых синтезирована искусственная нейронная сеть. В результате апробации предлагаемых решений на реальном объекте выявлены потери тепловой энергии при ее транспорте.

3. В ходе расширенного анализа данных были выявлены диапазоны наилучшей производительности котлов: загрузка должна составлять свыше 50 %, для котла RFB увеличение его загрузки даст наилучший эффект.

4. Безусловно, важным фактором является наличие измерительной системы для автоматизированного сбора и хранения технической информации (БД и БЗ), обеспечивающей большую прозрачность в принятии решений. В этой связи в перспективе предлагается использовать предложенный алгоритм ИАД для предупреждения в режиме он-лайн нерациональных режимов работы ЭКУ и возникновения аварийных режимов. При этом актуальным направлением является использование систем удаленной аналитики на основе Интернета.

Литература

References

1. Khoroshev N.I., Kazantsev V.P. Management support of electroengineering equipment servicing based on the actual technical condition // Automation and Remote Control. 2015. Vol. 76. Issue 6. P. 1058-1069.
2. Елтышев Д.К. Экспертно-статистический метод оценки работоспособности электротехнического оборудования // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 4 (28). С. 79-85.
3. Eltyshev D.K., Khoroshev N.I. Diagnostics of the power oil-filled transformer equipment of thermal power plants // Thermal Engineering. 2016. Vol. 63. Issue 8. P. 558-566.
4. Хайруллина О.И. Налоговые аспекты амортизационной политики // Налоги и налогообложение. 2012. № 1. С. 25-31.
5. Sciore E. Database design and implementation. New York: Wiley, 2008. 784 p.
6. Жаров П.В., Клер А.М. Оптимизация динамических процессов в котельном агрегате с использованием его нелинейной математической модели // Науч.-технические ведомости С.-Петербург. гос. политехн. ун-та. 2008. № 53. С. 41-49.
7. Khoroshev N.I., Pogorazdov R.N. Adaptive clustering method in intelligent automated decision support systems // Conference: Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016. 2016. P. 296-298.
8. Елтышев Д.К. Интеллектуализация процесса диагностики состояния электротехнического оборудования // Информатика и системы управления. 2015. № 1 (43). С. 72-82.
9. Елтышев Д.К. Интеллектуальные модели комплексной оценки технического состояния высоковольтных выключателей // Информационно-управляющие системы. 2016. № 5 (84). С. 45-53.
10. Shtovba S.D., Pankevich O.D., Nagorna A.V. Analyzing the criteria for fuzzy classifier learning // Automatic control and computer sciences. 2015. Vol. 49, Issue 3. P. 123-132.
11. Khoroshev N.I., Kazantsev V.P. Application of fuzzy logic rules during operation of electrotechnical equipment // Russian Electrical Engineering. 2011. Vol. 82. Issue 11. P. 632-637.
12. Хорошев Н.И. Оценка технического состояния силового маслонаполненного электротехнического оборудования в различных режимах его работы // Изв. Том. политехн. ун-та. 2013. Т. 323, № 4. С. 162-167.
13. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы, нечеткие системы / пер. с польск. И.Д. Рудинского. М., 2006. 452 с.
14. Горбань А.Н., Россиев Д.А. Нейронные сети на персональном компьютере. Новосибирск: Наука, 1996.
15. Ian H. W., Eibe F., Mark A. Data mining: practical machine learning tools and techniques. Hall, 2011.
16. Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive. Foundation 2nd. NJ: Prentice Hall PTR, 1998.
17. Казанцев В.П., Хорошев Н.И. Адаптивные экстраполяторы нулевого порядка с переменным тактом квантования в адаптивных информационно-управляющих системах // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2015. № 3 (37). С. 139-144.
18. Кычкин А.В. Протокол беспроводного сбора энергоданных для систем мониторинга реального времени // Вестн. Юж.-Уральского гос. ун-та. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2014. Т. 14, № 4. С. 126-132.
19. Кычкин А.В. Синтез системы удаленного энергетического мониторинга производства // Metallurg. 2015. № 9. С. 20-27.
20. Кычкин А.В. Программно-аппаратное обеспечение сетевого энергоучетного комплекса // Датчики и системы. 2016. № 7 (205). С. 24-32.
1. Khoroshev N.I., Kazantsev V.P. Management support of electroengineering equipment servicing based on the actual technical condition // Automation and Remote Control. 2015. Vol. 76. Issue 6. P. 1058-1069.
2. Eltyshev D.K. Expert statistical method for estimating the electrical equipment operability // Systems. Methods. Technologies. 2015. № 4 (28). P. 79-85.
3. Eltyshev D.K., Khoroshev N.I. Diagnostics of the power oil-filled transformer equipment of thermal power plants // Thermal Engineering. 2016. Vol. 63. Issue 8. P. 558-566.
4. Khairullina O.I. Tax aspects of depreciation policy // Taxes and Taxation. 2012. № 1. P. 25-31.
5. Sciore E. Database design and implementation. New York: Wiley, 2008. 784 p.
6. Zharov P.V., Kler A.M. Optimization of dynamic processes in a boiler unit using a nonlinear mathematical model // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. 2008. № 53. P. 41-49.
7. Khoroshev N.I., Pogorazdov R.N. Adaptive clustering method in intelligent automated decision support systems // Conference: Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016. 2016. P. 296-298.
8. Eltyshev D.K. Intellectualization of Diagnostics of Electric Machinery // Information Science and Control Systems. 2015. № 1 (43). P. 72-82.
9. Eltyshev D.K. Intellectual models for the integrated assessment of the technical condition of high-voltage switches // Informatsionno-upravliaushchie sistemy (Information and Control Systems). 2016. № 5 (84). P. 45-53.
10. Shtovba S.D., Pankevich O.D., Nagorna A.V. Analyzing the criteria for fuzzy classifier learning // Automatic control and computer sciences. 2015. Vol. 49, Issue 3. P. 123-132.
11. Khoroshev N.I., Kazantsev V.P. Application of fuzzy logic rules during operation of electrotechnical equipment // Russian Electrical Engineering. 2011. Vol. 82. Issue 11. P. 632-637.
12. Khoroshev N.I. Assessment of technical condition of power oil-filled engineering equipment in different operation modes // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2013. T. 323, № 4. P. 162-167.
13. Rutkovskaya D., Piliinskii M., Rutkovskii L. Neural networks, genetic algorithms, fuzzy systems / per. s pol's. I.D. Rudinskogo. M., 2006. 452 p.
14. Gorban' A.N., Rossiev D.A. Neural networks on a personal computer. Novosibirsk: Nauka, 1996.
15. Ian H. W., Eibe F., Mark A. Data mining: practical machine learning tools and techniques. Hall, 2011.
16. Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive. Foundation 2nd. NJ: Prentice Hall PTR, 1998.
17. Kazantsev V.P., Khoroshev N.I. Adaptive zero-order hold devices with variable quantization step time in adaptive information management system // Proceedings of TUSUR University. 2015. № 3 (37). P. 139-144.
18. Kychkin A.V. Protocol for wireless data collection for real-time monitoring systems // Bulletin of South Ural State University. Ser. "Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics". 2014. T. 14, № 4. P. 126-132.
19. Kychkin A.V. Synthesis of the remote energy production monitoring system // Metallurg. 2015. № 9. P. 20-27.
20. Kychkin A.V. Software and hardware of the network energy-accounting complex // Datchiki & Sistemi (Sensors & Systems). 2016. № 7 (205). P. 24-32.

Экспертная оценка влияния изменения параметров острого пара на долговечность элементов основного энергооборудования, работающего в условиях ползучести

А.Н. Кудряшов^а, И.И. Айзенберг^б, Н.Е. Буйнов^с, С.Н. Сушко^д

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

^аkan@istu.irk.ru, ^бeizenberg@mail.ru, ^сbujnov@istu.irk.ru, ^дsvetas@istu.irk.ru

Статья поступила 18.02.2017, принята 23.03.2017

Техническое состояние и долговечность элементов основного оборудования тепловых электрических станций (ТЭС) во многом определяются параметрами рабочего тела при стационарной работе. Изменение данных параметров приводит к изменению характеристик долговечности элементов, работающих в условиях ползучести. В статье рассматривается проблема оценки индивидуального остаточного ресурса ряда элементов основного оборудования ТЭС в зависимости от предполагаемых параметров рабочего тела. Рассматриваются элементы, работающие в условиях ползучести и (или) упругопластического деформирования при стационарных и переменных режимах работы оборудования. На основе приведенного анализа методов расчета остаточного ресурса предлагается методика определения такого ресурса на основе экспертной оценки вероятностей накопления повреждений и изменения прочностных свойств материала при длительной эксплуатации. Предлагаемая методика определения остаточного ресурса позволяет проводить экспертную оценку при незначительных объемах информации о режимах эксплуатации и состоянии металла на момент выработки паркового и индивидуального ресурса.

Ключевые слова: долговечность; ползучесть; металлы; давление; температура; напряжение; ресурс; поврежденность; разрушение.

Expert assessment of the impact of changes in steam parameters on the durability of the main elements of power equipment, operating under creep conditions

A.N. Kudryashov^a, I.I. Aizenberg^b, N.E. Bujnov^c, S.N. Sushko^d

Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

^akan@istu.irk.ru, ^beizenberg@mail.ru, ^cbujnov@istu.irk.ru, ^dsvetas@istu.irk.ru

Received 18.02.2017, accepted 23.03.2017

The technical condition and longevity of the elements of the main equipment of thermal power plants (TPPs) are largely determined by the parameters of the working fluid during stationary operation. The change in these parameters leads to a change in the characteristics of the longevity of elements operating under creep conditions. The article discusses the problem of assessing the residual life of a number of individual elements of the thermal power plant main equipment, depending on the estimated parameters of the working fluid. The article considers the elements operating under creep and (or) elastoplastic deformation at steady-state and variable load operation. Based on the presented analysis of the residual life calculation methods, a method is proposed for determining the residual life on the basis of peer review of the damage accumulation probability and changes in the strength properties of the material during long-term operation. The proposed method of determining the residual life allows for peer review provided little information on the operation modes and material conditions at the moment of fleet life exhaustion and individual element service life exhaustion.

Keywords: durability; creep; metal; pressure; temperature; stress; service life; damage; destruction.

Введение

Техническое состояние и долговечность элементов основного оборудования ТЭС во многом определяются параметрами рабочего тела при стационарной работе — температурой и давлением. Изменение данных параметров приводит к изменению характеристик долговечности элементов, работающих в условиях ползучести. Значительное влияние на долговечность оказывает скорость изменения рабочих параметров. К таковым относятся ступени пароперегревателя, стационарные

паропроводы острого пара, корпуса стопорных и регулирующих клапанов, корпуса цилиндров высокого давления, а также часть ротора высокого давления.

Ускоренное (замедленное) истощение ресурса работоспособности элемента приведет к более ранней (поздней) необходимости его диагностики и замены.

Теоретическая часть. Основным фактором является температура острого пара. Известно, что изменение температуры на 15–20 °С изменяет долговечность металла, работающего в условиях ползучести, почти в 2

раза [1–5]. Долговечность элементов конструкций можно описать рядом показателей: различного вида ресурсы, накопленная поврежденность, число пусков и т. д., в зависимости от характера нагружения.

Из показателей долговечности необходимо выбрать такой, с помощью которого можно будет наиболее объективно оценить влияние изменения параметров остро пара на долговечность на основе имеющейся эксплуатационной, проектной и ремонтной информации расчетным путем.

В первую очередь к показателям долговечности относится технический ресурс — случайная величина наработки элемента энергооборудования от начала эксплуатации или ее возобновления после ремонта до наступления предельного состояния [5; 6]. Под предельным понимается техническое состояние элемента, когда его дальнейшая эксплуатация недопустима по соображениям безопасности или экономической нецелесообразности ремонта. В качестве элементов рассматриваются корпуса, прямые трубы, гибы, сварные стыки и т. п.

В соответствии с видом элемента в нормативной литературе приводятся критерии предельных состояний, например, предельная деформация ползучести, глубина коррозионных повреждений, остаточная толщина стенки и т. п. Ряд критериев определяется характеристиками микроструктуры металла элементов.

Изменение технического состояния элемента происходит под действием эксплуатационных нагрузок: силовых, температурных, различных воздействий (коррозионных, эрозионных). В целом величина технического ресурса элемента зависит от конкретных рабочих напряжений в этом элементе при рабочей температуре на стационарных режимах работы или от размаха напряжений и температур на переменных режимах, а также от интенсивности процессов коррозии и эрозии.

С другой стороны, ресурс определяется характеристиками несущей способности материала элемента, а также распределением по телу элемента различного рода дефектов производства — металлургических, технологических и т. п. Последнее имеет особое значение для литых деталей [8–10].

Учитывая, что несущая способность металла имеет существенное рассеяние, начальное распределение дефектов неизвестно, реальные нагрузки и температуры имеют случайную составляющую, технический ресурс элементов — величина случайная. Расчетный и парковый ресурсы регламентируются для массовых изделий при среднестатистических условиях эксплуатации, поэтому расчетное определение технического ресурса отдельной детали на этапе проектирования не имеет смысла.

Эксплуатационный персонал интересуется, как правило, не полный технический ресурс элемента, а индивидуальный остаточный ресурс той или иной детали или узла. В соответствии с нормативной [11; 12] и научной [8–10; 13–15] литературой его можно оценить с помощью методов исследования металла элемента (методами разрушающей и неразрушающей дефектоскопии, контроля структуры металла, химического анализа и т. д.), геометрических измерений и т. п. Для каждого элемента эта процедура весьма длительная, дорогостоящая

и может выполняться лишь специализированной организацией.

К следующей базовой характеристике долговечности относится парковый ресурс. Согласно [7; 8], парковый ресурс — наработка однотипных по конструкции, маркам стали и условиям эксплуатации элементов теплоэнергетического оборудования, которая обеспечивает их безаварийную работу при соблюдении требований действующей нормативно-технической документации. Парковый ресурс оценивается по номинальному типоразмеру трубы и по установленной температуре эксплуатации. При этом не предусматривается корректировка значения паркового ресурса в зависимости от реальной толщины стенки и температуры. Согласно [12], значения паркового ресурса для труб разных типоразмеров и различных параметров были получены механически — это точка пересечения линии приведенного напряжения с нижней границей полосы разброса значений длительной прочности для конкретной температуры. В работах [10–14] предлагается определять приведенный парковый ресурс, в какой-то степени учитывающий реальную начальную толщину стенки и температуру эксплуатации. Однако сомнительно, что даже по приведенному парковому ресурсу можно судить о реальном техническом ресурсе отдельного элемента.

К настоящему времени значительная часть основного оборудования выработала расчетный и парковый ресурсы (до 50–60 %), возможно, поэтому понятие паркового ресурса в последних нормативных документах по определению остаточного ресурса не рассматривается, а индивидуальный и остаточный ресурсы определяются практически, по исчерпанию паркового ресурса. Считаем, что понятие паркового ресурса следует оставить для элементов, работающих в условиях снятия слоя упругопластического деформирования. По достижению паркового ресурса проводится вышеуказанное обследование металла и работы элемента, устанавливается индивидуальный ресурс — назначенный ресурс конкретного объекта, определенный с учетом фактических свойств металла и условий эксплуатации. Проведение ряда мероприятий по восстановлению работоспособности (например, поврежденного металла) или термообработка позволяют продлить срок службы оборудования, назначив индивидуальный ресурс. По исчерпанию индивидуального ресурса возможно его продление на основе обследования состояния оборудования, определения остаточного ресурса и выполнения необходимых мероприятий.

На рис. 1 приведена последовательность работ по продлению срока службы теплосилового оборудования [12].

Индивидуальный ресурс в большей степени, чем другие рассмотренные показатели долговечности, соответствует понятию технического ресурса с некоторым запасом прочности. Согласно [3; 10–12], этот запас составляет от 1,15 для высоконагруженных гибов паропровода до 1,5 и выше — для корпусных деталей.

Однако для определения индивидуального ресурса элементов ТЭС, работающих в условиях ползучести, требуется масштабная работа службы металлов и большее число расчетов по определению эквивалентных напряжений в элементах.



Рис. 1. Продление ресурса теплосилового оборудования ТЭС

Учитывая количество элементов, на это уйдет несколько лет, и потребуются большие материальные затраты. Поэтому единственным показателем из рассмотренных, которым можно пользоваться при оценке влияния изменения параметров острого пара, является техническое состояние элемента на момент истощения паркового ресурса [16].

Техническое состояние любого работающего элемента оборудования можно оценить по накопленной в его материале поврежденности. С физической точки зрения, поврежденность проявляется в виде разрушений на микро- и макроструктуре металла. В частности, в зависимости от условий работы деталей при ползуче-

сти в теплоустойчивой стали различают три вида разрушений [8, 10–12]:

- вязкое разрушение;
- образование и рост клиновидных трещин;
- разрушение порообразованием.

Вязкое разрушение часто встречается при повышении температуры при работе труб поверхности нагрева в условиях ползучести (при высоких уровнях нагрузки). Разрушение носит внутризёрный характер.

Разрушение путем образования клиновидных трещин развивается либо в зонах концентрации напряжений, либо связано с охрупчиванием металла при невысоких нагрузках и носит межзёрный характер.

Образование пор по границам зёрен происходит при пониженных напряжениях в условиях длительной эксплуатации. В настоящее время активно используется нормативная методика оценки остаточного ресурса элементов по наличию пор или цепочек пор в микроструктуре металла элемента.

Математическими моделями физического процесса накопления поврежденности металла элементов оборудования являются теории накопления повреждений. Имеется линейная теория накопления повреждений и большое число нелинейных теорий, требующих на порядок больший объем информации для реализации. Поэтому чаще всего используют линейную теорию накопления напряжений.

Согласно линейной теории, поврежденность металла является неубывающей функцией времени эксплуатации элемента, изменяясь от $D_{нач} = 0$ начальной величины до предельной величины $D_{пр} = 1$. Величина $D_{нач}$ соответствует вводу элемента в эксплуатацию, $D_{пр}$ — предельному состоянию элемента. Вторым условием линейной модели суммирования повреждений является то, что характер повреждений от любых видов нагрузки (стационарная нагрузка элемента в условиях ползучести, упругопластическое деформирование в пуско-остановочных режимах, напряжения от температурных перемещений и т. д.) считается одинаковым, поэтому их можно суммировать линейно.

В качестве примера рассмотрим применение линейной теории суммирования повреждений для материала корпуса стопорного клапана. Металл корпуса клапана испытывает ползучесть под действием эквивалентных напряжений. При расчете этих напряжений можно учесть истончение стенок из-за коррозии и эрозии, а также концентрацию напряжений. При расчетной температуре эксплуатации по кривой длительной прочности определяется время до разрушения по критерию длительной прочности для соответствующего эквивалентного напряжения τ_{pi} , и тогда накопленное повреждение за определенную наработку на i -м стационарном режиме τ_i :

$$D_{цикл} = \tau_i / \tau_{pi}.$$

Так как корпус является толстостенной деталью, подверженной малоцикловой усталости при пуско-остановочных режимах, то поврежденность при переменных режимах можно определить отношением числа циклов определенного j -го вида (например, пуск из холодного состояния — останов свыше 72 ч) N_j к числу циклов такого вида до разрушения, определенному по размаху деформации в цикле (полной или пластической) N_{pj} по известным расчетным зависимостям, в частности по формуле Мэнсона [1–4]:

$$D_{цикл} = N_j / N_{pj}.$$

Если отслеживать режимы эксплуатации с самого ее начала, иметь двухмерную, а лучше трехмерную модель расчета напряженно-деформированного состояния, то, ежегодно подсчитывая накопленную за предыдущий год поврежденность, можно расчетным путем определить остаточный ресурс элемента.

Для реализации этого подхода также требуется весьма обширный объем информации по эксплуатационным режимам с начала эксплуатации, толщине стенок и геометрии элементов, регистрация скоростей набора температуры во время пуска и т. д., а также большой объем расчетной работы. Кроме того, накопленная поврежденность — случайная величина, зависящая от рассеяния характеристик несущей способности металла элемента и от разброса нагрузок. Расчет параметров рассеяния накопленной поврежденности также требует дополнительных усилий и информации.

Еще одним способом оценки влияния параметров острого пара на долговечность могла бы стать информация об отказах на том или ином наборе параметров пара. Однако теплоэнергетическое оборудование отказывает весьма редко, а каждый элемент имеет индивидуальное сочетание несущей способности и нагрузок в процессе эксплуатации. Поэтому доказать конкретную роль того или иного набора параметров практически невозможно.

Итак, на основе анализа методов расчета показателей долговечности видно, что ни один из них не может быть использован напрямую для учета влияния изменения параметров свежего пара на долговечность элементов теплосилового оборудования. Поэтому необходимо использовать метод экспертной оценки, адекватный имеющейся информации и позволяющий определить экономический эффект от относительного увеличения (уменьшения) долговечности оборудования при изменении параметров острого пара.

В рамках работы по обоснованию выбора начальных параметров острого пара разработана методика экспертной оценки влияния их изменения на долговечность элементов основного энергооборудования, работающего в условиях ползучести [17].

Методика экспертной оценки базируется на следующих предположениях:

- при изменении параметров острого пара рассматривается только один вид разрушения — ползучесть (при увеличении температуры и величины эквивалентного напряжения скорость ползучести возрастает, при уменьшении — падает). При этом основную роль играет температура острого пара;

- считается, что в период эксплуатации до достижения паркового ресурса вероятность отказа элементов оборудования — равной нулю;

- исчерпание долговечности происходит из-за накопления повреждений (используется линейная теория суммирования повреждений). Предельное состояние элемента отвечает накопленному повреждению $D_{пр} = 1$;

- принимается, что накопленное повреждение имеет разброс, вызванный рассеянием несущей способности материала конструкции и изменениями эквивалентного напряженно-деформированного состояния. Принимается нормальный закон распределения накопленного повреждения. Ширина полосы рассеяния составляет 6σ , где σ — среднеквадратическое отклонение величины D от $D_{пр}$, которое для нормального закона распределения делит площадь под кривой распределения пополам;

– принимается, что полоса рассеяния накопленной поврежденности литого металла существенно (в 2–2,5 раза) шире, чем у деформированного. Связано это с более высоким числом технологических дефектов в литых элементах по сравнению с элементами, изготовленными методами пластического деформирования, и несовершенством технологии литья.

Графическое изображение процесса накопления повреждений приведено на рис. 2.

Принимается, что ширина полосы рассеяния не зависит от наработки. Отметим, что согласно одним исследованиям, ширина полосы рассеяния растет с наработкой из-за изменчивости нагрузки, неравномерности коррозионного процесса и т. д.

Другой подход предполагает сужение полосы рассеяния накопленного повреждения с наработкой из-за выявления и устранения во время ремонтов технологических дефектов материала элементов.

Угол α на рис. 2 соответствует скорости накопления повреждений из-за ползучести материала элемента при определенной температуре эксплуатации (например, 555 °С). Если температура будет выше, угол α будет больше, для меньших температур металла — меньше. При этом принимается, что ширина полосы рассеяния не изменится. Таким образом, можно построить вспомогательный график зависимости скорости накопления повреждений (угла α) от рабочей температуры металла элемента (рис. 3).

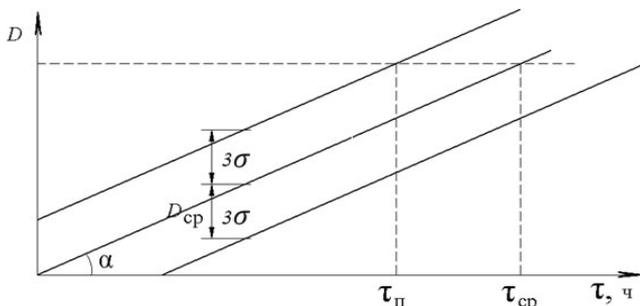


Рис. 2. Процесс накопления повреждений: τ_n — паркoвый ресурс элемента; τ_{cp} — средний ресурс элемента (вероятность отказа 50 %)

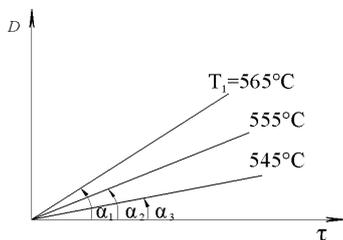


Рис. 3. Процесс накопления повреждений в зависимости от температуры среды

Тогда накопление повреждений в течение эксплуатации, когда производилось изменение параметров острого пара, будет выглядеть так, как представлено на рис. 4. Элементы с начала эксплуатации работали на проектных параметрах острого пара (скорость накопления повреждений $V_{D2} = \text{tg } \alpha_2$), затем, после наработки τ_1 , был осуществлен переход на пониженные пара-

метры ($V_{D3} = \text{tg } \alpha_3$), при τ_2 вернулись на проектные параметры, а при τ_3 перешли на повышенные параметры ($V_{D1} = \text{tg } \alpha_1$). Согласно принятым допущениям, вследствие такой эксплуатации считается, что до наработки $\tau_n^{изм}$ вероятность отказа равна нулю, т. е. $Q = 0$.

После построения графика накопления повреждений с учетом изменения параметров острого пара определяется вероятность безотказной работы P . При наработке $\tau > \tau_n^{изм}$ вероятность отказа Q соответствует площади под кривой распределения, отсекаемой накопленным повреждением $D_{np} = 1$ (рис. 5).

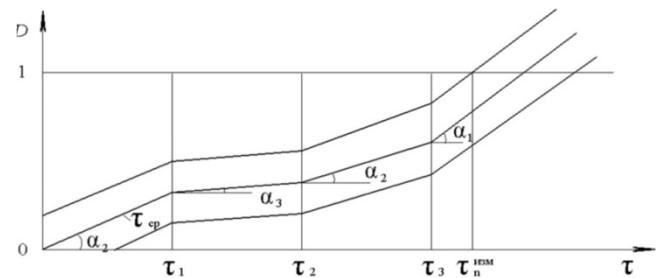


Рис. 4. Процесс накопления повреждений в течение эксплуатации

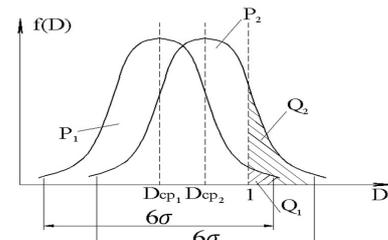


Рис. 5. Плотность распределения накопленного повреждения металла элемента при наработках $\tau > \tau_n^{изм}$

С ростом срока эксплуатации накопленное повреждение растет ($Q_2 > Q_1$), а вероятность безотказной работы снижается ($P_2 < P_1$).

Тогда можно регламентировать минимальную вероятность безотказной работы P_{min} и, следовательно, наработку.

Соответственно, смещается и величина среднего накопленного повреждения $D_{cp2} > D_{cp1}$.

Учитывая, что закон распределения накопленного повреждения принят нормальным, а ширина полосы распределения остается неизменной ($\sigma = \text{const}$), σ — среднеквадратическое отклонение накопления повреждения, вероятность безотказной работы определится из зависимости [13–15]:

$$P = \int_0^1 f(D)dD \quad \text{или} \quad P = 1 - \Phi[(D - D_{cp})/\sigma],$$

где $\Phi[(D - D_{cp})/\sigma]$ — нормированная функция нормального распределения.

Подход при определении долговечности элементов, изготовленных методом литья и методами пластического деформирования, одинаков, отличаются лишь полосы рассеяния. На рис. 6 представлены плотности распределения накопленного повреждения металла элемента, изготовленного различными методами.

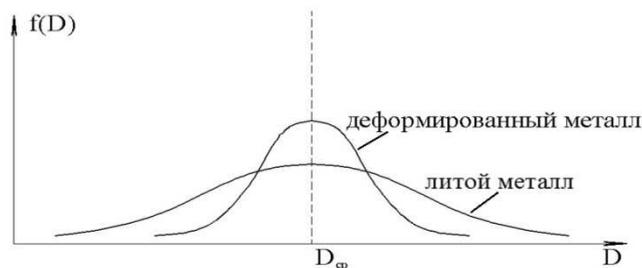


Рис. 6. Плотность распределения накопленного повреждения металла элемента, изготовленного различными методами

Заключение

Полученная оценка вероятности безотказной работы элементов оборудования, работающего в условиях ползучести, является экспертной, она пригодна лишь для оценки влияния изменения начальных параметров острого пара и не претендует на объективную меру надежности рассматриваемых деталей

Литература

1. Бугай Н.В., Березина Т.Г., Трунин И.И. Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования. М.: Энергоатомиздат, 1994. 272 с.
2. Балина В.С., Ланин А.А. Прочность и долговечность конструкций при ползучести. СПб.: Политехника, 1996. 182 с.
3. Островейковский В.А., Сальников Н.Л. Вероятностное прогнозирование работоспособности элементов ЯЭУ. М.: Энергоатомиздат, 1990. 416 с.
4. Антикайн П.А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов. -2-е изд. М.: Энергия, 1980. 424 с.
5. Ланская К.А. Жаропрочные стали. М.: Metallurgiya, 1969. 247 с.
6. Ресурс и надежность материалов и сварных соединений энергетических установок / под ред. Ю.К. Петрени, А.И. Рыбникова, А.А. Ланина. СПб.: Изд-во ОАО "НПО ЦКТИ", 2002. Вып. 286. 186 с.
7. Должанский П.Р. Особенности оценки остаточного ресурса паропроводных труб при эксплуатации сверх паркового ресурса // Теплоэнергетика. 2005. № 8. С. 35-39.
8. Гофман Ю.Н. Оценка работоспособности металла энергооборудования ТЭС. М.: Энергоатомиздат, 1990. 136 с.
9. Резинских Р.Ф., Гринь Е.А., Злепко В.Ф. Концепция продления ресурса металла оборудования ТЭС // Промышленная теплоэнергетика. 2004. № 4. С. 25-29.
10. Кудряшов А.Н., Айзенберг И.И., Буйнов Н.Е., Сушко С.Н. Оценка перехода ТЭС на проектные начальные параметры пара // Материалы II науч.-практической конф. с междунар. участием «Инновационная энергетика 2010». Новосибирск, 2010. С. 24-26.
11. Паули В.К. К оценке надежности работы энергетического оборудования // Теплоэнергетика. 1996. № 12. С. 37-41.

12. Тумановский А.Г., Резинских Р.Ф. Стратегия продления ресурса и технического перевооружения тепловых электростанций // Теплоэнергетика. 2001. № 6. С. 3-10.

13. Резинских Р.Ф. Еще раз о ресурсе энергооборудования // Надежность и безопасность энергетики. 2009. № 4. С. 9-11.

14. Айзенберг И.И., Буйнов Н.Е., Кудряшов А.Н. Методика экспертной оценки влияния изменения параметров острого пара на долговечность элементов основного оборудования энергоустановок // Материалы Всерос. науч.-практической конф. с междунар. участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири». Иркутск, 2007. С. 119-124.

References

1. Bugai N.V., Berezina T.G., Trunin I.I. The efficiency and durability of the power equipment of metal. M.: Energoatomizdat, 1994. 272 p.
2. Balina V.S., Lanin A.A. The strength and durability of structures in creep. SPb.: Politehnika, 1996. 182 p.
3. Ostroveikovskii V.A., Sal'nikov N.L. Probabilistic forecast performance elements NPP. M.: Energoatomizdat, 1990. 416 p.
4. Antikain P.A. Metals and strength calculation of boilers and pipelines. 2-e izd. M.: Energiya, 1980. 424 p.
5. Lanskaya K.A. Heat-resistant steel. M.: Metallurgiya, 1969. 247 p.
6. Resource and reliability of materials and welded soedineniyenergeticheskikh plants / pod red. Yu.K. Petreni, A.I. Rybnikova, A.A. Lanina. SPb.: Izd-vo OAO "NPO TsKTI", 2002. Vyp. 286. 186 p.
7. Dolzhanskii P.R. Features of residual life assessment conductivity of steam pipes in operation in excess of park resources // Thermal Engineering. 2005. № 8. P. 35-39.
8. Gofman Yu.N. Evaluation of efficiency of power metal TPP. M.: Energoatomizdat, 1990. 136 p.
9. Rezinskikh R.F., Grin' E.A., Zlepko V.F. Concept extending resource the metal equipment TPP // Promyshlennaya teploenergetika. 2004. № 4. P. 25-29.
10. Kudryashov A.N., Aizenberg I.I., Buinov N.E., Sushko S.N. Evaluation of the transition TPP to design the initial parameters of steam // Materialy II nauch.-prakticheskoiy konf. s mezhdu-nar. uchastiem «Innovatsionnaya energetika 2010». Novosibirsk, 2010. P. 24-26.
11. Pauli V.K. By assessing the reliability of the power equipment // Thermal Engineering. 1996. № 12. P. 37-41.
12. Tumanovskii A.G., Rezinskikh R.F. Strategy for life extension and modernization of thermal power // Thermal Engineering. 2001. № 6. P. 3-10.
13. Rezinskikh R.F. Once again on the resource of power // Safety & Reliability of Power Industry. 2009. № 4. P. 9-11.
14. Aizenberg I.I., Buinov N.E., Kudryashov A.N. Technical and economic analysis of the impact of changes in the initial steam parameters on the durability of elements of the main equipment of power plants // Materialy Vseros. nauch.-prakticheskoiy konf. s mezhdu-nar. uchastiem «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri». Irkutsk, 2007. P. 119-124.

Передача электрической энергии пониженного качества по однопроводной линии электропередачи

Г.А. Большанин^{1 а}, Е.Г. Скулина^{2 б}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет, пр. Карла Маркса 20, Новосибирск, Россия

^аbolshaning@mail.ru, ^бdream.len@yandex.ru

Статья поступила 28.02.2017, принята 30.03.2017

Сформулированы основные особенности передачи электрической энергии пониженного качества по линии электропередачи однопроводного исполнения. Предложены электрическая схема замещения однородного участка линии электропередачи однопроводного исполнения и математическая модель распределения по нему электрической энергии пониженного качества. Составлены уравнения распределения напряжения и тока по однородному участку линии электропередачи однопроводного исполнения в условиях пониженного качества электрической энергии. Отмечен волновой характер распределения электрической энергии по токоведущим частям линии электропередачи. Показана методика определения вторичных параметров линии электропередачи однопроводного исполнения: постоянной распространения электромагнитного поля по проводам линии электропередачи, волнового сопротивления и фазовой скорости. Приведены расчетные формулы для определения численных значений постоянных интегрирования. Обращено внимание на то, что скорость распространения электромагнитного поля по проводам линии электропередачи меньше, чем скорость распространения этого поля в вакууме. Предложена методика определения длины электромагнитного поля в токоведущих частях линии электропередачи однопроводного исполнения на частоте каждой гармонической составляющей напряжения и тока, а также методика определения скорости распространения этого поля в материальной среде. Сформулирована методика определения численных значений напряжения и тока на однородном участке линии электропередачи однопроводного исполнения практически любой протяженности. Отмечено, что для качественного прогнозирования результатов передачи электрической энергии пониженного качества по линии электропередачи однопроводного исполнения необходимы достоверные сведения о первичных параметрах этой линии, а также о спектральном составе напряжения и тока в начале или в конце анализируемого участка ЛЭП.

Ключевые слова: линия электропередачи; падающая волна; отраженная волна; постоянная распространения; волновое сопротивление; постоянная интегрирования; математическая модель; передаточная функция; амплитудно-частотная характеристика.

Transmission of low-quality electrical energy through a single-wire power line

G.A. Bolshinin^{1а}, E.G. Skulina^{2б}

¹Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

²Novosibirsk State Technical University; 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, Russia

^аbolshaning@mail.ru, ^бdream.len@yandex.ru

Received 28.02.2017, adopted .30.03.2017

The basic features of the transmission of low-quality electric power through the single-wire transmission line are formulated. The electric circuit for replacing a homogeneous section of the electrical transmission line of a single-wire version and a mathematical model for distributing electric energy of lower quality along it are proposed. Equations of voltage and current distribution along a homogeneous section of an electrical transmission line of a single-wire design in the conditions of a reduced quality of electric energy have been compiled. Wave character of distribution of electric energy on current-carrying parts of a power transmission line is noted. The technique for determining the secondary parameters of a single-wire transmission line is shown: the propagation constant of the electromagnetic field along the transmission line wires, the wave impedance and the phase velocity. The calculation formulas for determining the numerical values of the integration constants are given. Attention is drawn to the fact that the speed of propagation of the electromagnetic field along the transmission line wires is less than the propagation velocity of this field in a vacuum. A method for determining the length of an electromagnetic field in current-carrying parts of a single-wire power transmission line at the frequency of each harmonic component of voltage and current, as well as a technique for determining the propagation velocity of this field in a material medium, are proposed. A technique for determining the numerical values of voltage and current in a homogeneous section of an electrical transmission line of a single-wire execution of almost any length is developed. It is noted that reliable information on the primary parameters of this line, as well as on the spectral composition of voltage and current at the beginning or at the end of the analyzed section of the transmission line, is required for qualitative prognosis of the results of transmission of electric energy of reduced quality through the single-wire power transmission line.

Keywords: power line; incident wave; reflected wave; propagation constant; wave impedance; integration constant; mathematical model; transfer function; amplitude-frequency characteristic.

Введение

Теория передачи электрической энергии по однопроводной линии электропередачи (ЛЭП) достаточно хорошо разработана и широко используется в инженерных расчетах.

При анализе процессов передачи электрической энергии ЛЭП делятся на линии с сосредоточенными параметрами и линии с распределенными параметрами. Критерием такого деления должна служить протяженность ЛЭП. Линии протяженностью менее 4–5 % от длины волны электромагнитного поля, обеспечивающего передачу по ним электрической энергии, считаются линиями с сосредоточенными параметрами, а линии большей протяженности — линиями с распределенными параметрами. При длине волны 6 000 км данная граница определяется величиной 200–300 км, но это если игнорировать наличие материальной среды в проводах ЛЭП и уравнивать скорость распространения электромагнитного поля в проводах ЛЭП со скоростью распространения этого поля в вакууме. То есть, это очень грубое допущение, которое существенно искажает физическую сущность передачи электрической энергии по ЛЭП, тем более при передаче электрической энергии пониженного качества, характеризующейся показателями, достигшими или даже превысившими свои нормативные значения [1].

В данном случае важны такие характеристики качества электрической энергии, как отклонения, колебания и особенно несинусоидальность напряжения, поскольку нарушение этой характеристики сопровождается появлением высокочастотных и низкочастотных (субгармонических) составляющих. Это обстоятельство вызвано тем, что изменение частоты существенно влияет на величину длины волны электромагнитного поля, а значит, и на передачу электрической энергии по проводам ЛЭП.

Напряжения и токи, характеризующие электрическую энергию, передаваемую по современным ЛЭП, обладают широким спектром высоко- и низкочастотных составляющих, в том числе постоянной составляющей. Об этом свидетельствуют результаты мониторинга качества электрической энергии в действующих электроэнергетических системах [2].

Поскольку не перегруженные ЛЭП можно считать линейными, при анализе передачи по ним электрической энергии можно использовать принцип суперпозиций. То есть, анализ распространения каждой n -й гармонической составляющей, а также постоянной составляющей ($n = 0$) напряжения и тока можно выполнять отдельно, при необходимости — с последующим обобщением результатов [3].

Передачу электрической энергии, а именно ее основных характеристик, каковыми являются напряжение и ток, целесообразно рассматривать на основании математической модели этого процесса.

Математическая модель передачи напряжения и тока строится на основании электрической схемы замещения в данном случае однопроводной линии электропередачи для n -й гармонической составляющей напряжения и тока, которая отражала бы все происходящие в ней процессы преобразования энергии. Причем гармоническая составляющая может быть любая: высокочас-

тотная, низкочастотная или даже дробная. Для их выявления можно использовать либо специализированные электроизмерительные приборы, либо специальные способы определения гармонических составляющих напряжения и тока [4–9].

Чем больше частота гармонической составляющей напряжения и тока, тем меньше протяженность ЛЭП, где проявляется так называемый эффект длинных линий, который заключается в нелинейном распределении напряжения и тока вдоль анализируемой линии электропередачи. На частоте 3-й гармонической составляющей эффект начинает проявляться уже на участке ЛЭП протяженностью 70 км, на частоте 5-й гармонической составляющей — на участке протяженностью 30 км, на 9-й — на участке протяженностью 10 км и т. д. [3]. Это если считать, что длина волны электромагнитного поля в ЛЭП равна 6 000 км, а поскольку на самом деле она гораздо меньше, то и указанные протяженности участков ЛЭП тоже будут много меньше.

Из этого следует, что для гарантированного учета нелинейности распределения напряжения и тока вдоль анализируемой ЛЭП даже сравнительно небольшой протяженности эту линию электропередачи следует принять за линию с распределенными параметрами.

Методика исследования. Линиями с распределенными параметрами называют линии, в которых напряжение и ток изменяются при переходе от одного места (сечения) к другому. Схему замещения такой линии при ее однопроводном исполнении целесообразно строить для однородного участка элементарной протяженности, как это показано на рис. 1.

Математическая модель выделенного участка представляет собой систему из двух уравнений, составленных на основании первого и второго законов Кирхгофа [3; 10–12]:

$$\left. \begin{aligned} i_n &= di_n + i_n + \frac{\partial i_n}{\partial l} dl; \\ u_n &= i_n R_{0n} dl + L_{0n} dl \frac{\partial i_n}{\partial t} + u_n + \frac{\partial u_n}{\partial t} dl. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Общий вид решения этих уравнений может быть представлен так:

$$\dot{U}_n = A_{1n} e^{\gamma_n l} + A_{2n} e^{-\gamma_n l}; \quad (2)$$

$$I_n = \frac{A_{2n} e^{-\gamma_n l} - A_{1n} e^{\gamma_n l}}{Z_{cn}}, \quad (3)$$

где A_{1n} и A_{2n} — постоянные интегрирования; γ_n — постоянная распространения электромагнитного поля по однородному участку ЛЭП однопроводного исполнения на частоте n -й гармонической составляющей, определяемая по формуле $\gamma_n = \sqrt{Z_{0n} Y_{0n}}$; Z_{cn} — волновое сопротивление линейного провода однородного участка однопроводной линии электропередачи на частоте n -й гармонической составляющей, определя-

емое по формуле: $Z_{cn} = \sqrt{\frac{Z_{0n}}{Y_{0n}}}$;

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{0n} &= R_{0n} + jn\omega L_{0n}; \\ \underline{Y}_{0n} &= G_{0n} + jn\omega C_{0n}; \\ \omega &= 2\pi f; \end{aligned}$$

f — частота изменения напряжения и тока во времени.
 Постоянная распространения электромагнитного поля вдоль однородного участка ЛЭП зависит лишь от

первичных параметров этого участка и является комплексной величиной:

$$\gamma_n = \beta_n + j\alpha_n,$$

где β_n — коэффициент затухания n -й гармонической составляющей волны электромагнитного поля; α_n — коэффициент фазы этой же волны.

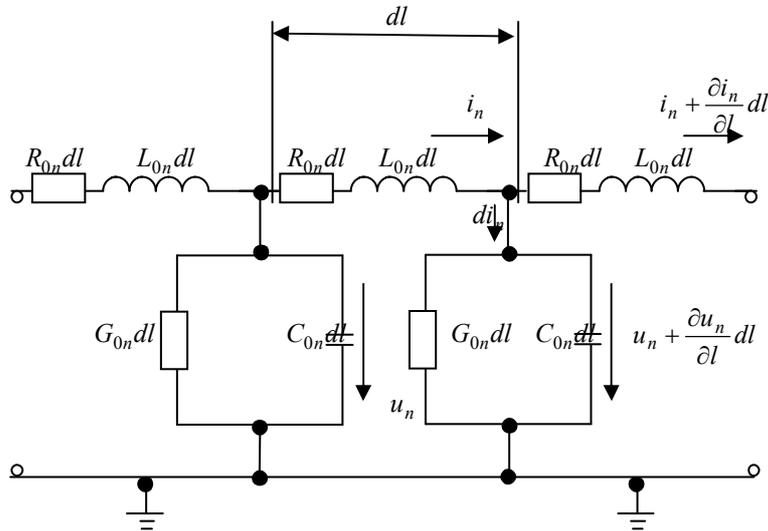


Рис. 1. Электрическая расчетная схема замещения элементарного участка однородной линии электропередачи однопроводного исполнения на частоте n -й гармонической составляющей

Уравнение (2) определяет общий вид уравнения распределения напряжения вдоль однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения, а уравнение (3) — общий вид уравнения распределения тока вдоль этого же участка ЛЭП.

Судя по уравнениям (2) и (3), передача электрической энергии по однопроводной ЛЭП осуществляется парой волн электромагнитного поля, одной падающей и одной отраженной. Амплитуда этих волн характеризуется постоянными интегрирования A_{1n} и A_{2n} . Причем постоянная интегрирования A_{1n} характеризует амплитуду отраженной волны электромагнитного поля, а A_{2n} — падающей.

Получается, что электрическая энергия от генерирующих устройств (начало анализируемого участка ЛЭП) падающей волной электромагнитного поля доставляется электрической нагрузке (конец анализируемого участка ЛЭП). Но вся электрическая энергия, доставляемая к концу однородного участка ЛЭП, электрической нагрузкой не потребляется, а в виде отраженной волны электромагнитного поля возвращается обратно к началу участка линии электропередачи. Судя по уравнениям (2) и (3), на этом транспортировка электрической энергии заканчивается, т. е. амплитуда отраженной волны электромагнитного поля затухает до нуля. Фактически, это происходит лишь при достаточно большом коэффициенте затухания, а при малых затуханиях возможны вторичные, третичные и т. д. падающие и отраженные волны электромагнитного поля. Эти волны крайне негативно сказываются на достоверности прогнозирования напряжения, тока и мощности на участках ЛЭП, на качестве передаваемой электрической

энергии, пропускной способности линии электропередачи и т. д.

Согласно рекомендациям теоретической электротехники, постоянные интегрирования определяются по формулам:

$$\begin{aligned} A_{1n} &= \frac{\dot{U}_{1n} - \dot{I}_{1n} \underline{Z}_{\tilde{n}n}}{2}; \\ A_{2n} &= \frac{\dot{U}_{1n} + \dot{I}_{1n} \underline{Z}_{\tilde{n}n}}{2}, \end{aligned}$$

где \dot{U}_{1n} и \dot{I}_{1n} — напряжение и ток в начале исследуемого участка ЛЭП однопроводного исполнения на частоте n -й гармонической составляющей.

При подстановке этих формул в уравнения (2) и (3) получается, что:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_n &= \frac{\dot{U}_{1n} - \dot{I}_{1n} \underline{Z}_{\tilde{n}n}}{2} e^{\gamma_n l} + \frac{\dot{U}_{1n} + \dot{I}_{1n} \underline{Z}_{\tilde{n}n}}{2} e^{-\gamma_n l}; \\ \dot{I}_n &= \frac{\dot{U}_{1n} + \dot{I}_{1n} \underline{Z}_{\tilde{n}n}}{2 \underline{Z}_{\tilde{n}n}} e^{-\gamma_n l} - \frac{\dot{U}_{1n} - \dot{I}_{1n} \underline{Z}_{\tilde{n}n}}{2 \underline{Z}_{\tilde{n}n}} e^{\gamma_n l}. \end{aligned} \right\}$$

Иначе эти уравнения можно переписать так:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_n &= \dot{U}_{1n} ch \gamma_n l - \dot{I}_{1n} \underline{Z}_{\tilde{n}n} sh \gamma_n l; \\ \dot{I}_n &= \dot{I}_{1n} ch \gamma_n l - \frac{\dot{U}_{1n}}{\underline{Z}_{cn}} sh \gamma_n l. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Это если известны напряжения и токи на частоте n -й гармонической составляющей в начале исследуемого участка ЛЭП.

Если известны только напряжение \dot{U}_{2n} и ток \dot{I}_{2n} на частоте той же гармонической составляющей в конце однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения, то следует рассуждать несколько иначе:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_n &= \dot{U}_{2n} ch\gamma_n y + \dot{I}_{2n} \underline{Z}_{cn} sh\gamma_n y; \\ \dot{I}_n &= \frac{\dot{U}_{2n}}{\underline{Z}_{cn}} sh\gamma_n y + \dot{I}_{2n} ch\gamma_n y. \end{aligned} \right\}$$

Пусть анализу подлежит однородный участок ЛЭП однопроводного исполнения с погонным активным сопротивлением $R_0 = 0,74$ Ом/км, с собственной индуктивностью $L_0 = 1,28$ мГн/км, с активной проводимостью $G_0 = 10^{-16}$ См/км, с емкостью между линейным проводом и поверхностью земли $C_0 = 9 \cdot 10^{-9}$ Ф/км на частоте n -й гармонической составляющей. В таком случае графические интерпретации распределения напряжения и тока от конца однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения протяженностью 50 км на частоте основной гармонической составляющей будут аналогичны изображенным на рис. 2 и 3.

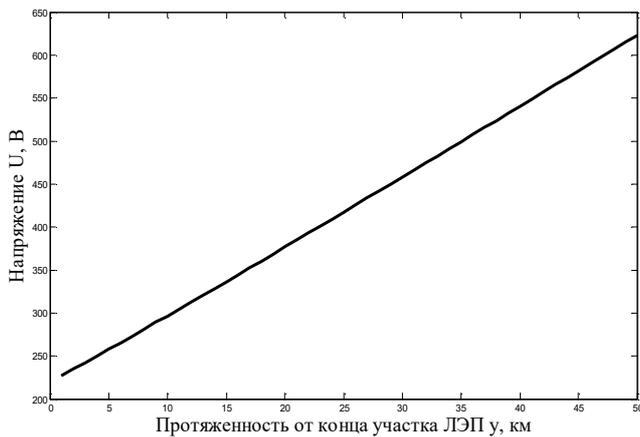


Рис. 2. Графическая интерпретация распределения напряжения от конца однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения на частоте основной гармонической составляющей

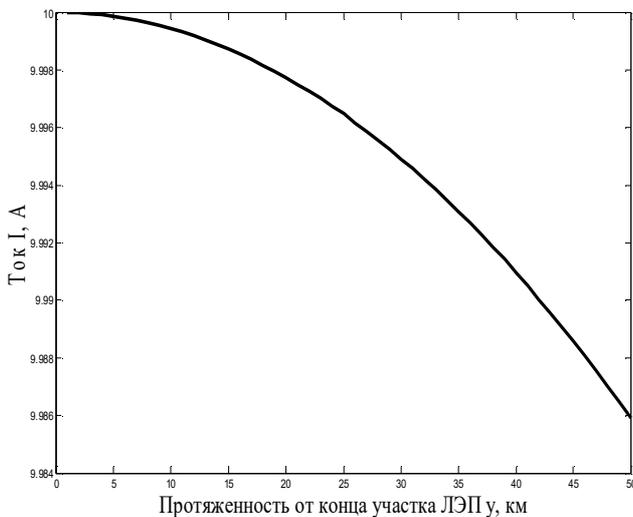


Рис. 3. Графическая интерпретация распределения тока от конца однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения на частоте основной гармонической составляющей

Здесь не удалось зафиксировать волновой характер передачи электрической энергии по однородному участку ЛЭП однопроводного исполнения из-за малой протяженности анализируемого участка линии электропередачи и малой частоты изменения напряжения и тока во времени.

Предположим увеличение протяженности анализируемого участка ЛЭП в 10 раз. Причем для получения лучшего эффекта повысим частоту изменения напряжения и тока во времени до частоты 13-й гармонической составляющей.

При этих условиях постоянная распространения волн электромагнитного поля вдоль однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения оказывается равной $\gamma_{13} = (0,001 + j0,0139)$ км⁻¹. Это означает, что коэффициент затухания в данном случае равен $\beta_{13} = 0,001$ км⁻¹, а коэффициент фазы $\alpha_{13} = 0,0139$ км⁻¹.

Расчетное значение постоянной распространения волн электромагнитного поля вдоль однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения оказывается равным $\gamma_{13} = (-0,001 - j0,0139)$ км⁻¹. Эта величина свидетельствует о том, что выполняются рекомендации теорем Ляпунова [13], а значит, выполняются критерии статической устойчивости передачи электрической энергии по анализируемому участку ЛЭП [14]. Но трактовка уравнений распределения напряжения (2) и тока (3) вдоль однородного участка однопроводной ЛЭП такова, что коэффициент затухания β_n должен быть положительным. Поэтому результат расчета домножен на отрицательную единицу (-1).

Волновое сопротивление анализируемого участка ЛЭП на частоте 13-й гармонической составляющей оказывается равным: $\underline{Z}_{c13} = (378,06 - j26,426)$ Ом.

Фазовая скорость волны электромагнитного поля, в таком случае, на частоте 13-й гармонической составляющей будет определяться так:

$$v = \frac{dl}{dt} = \frac{n\omega}{\alpha_n} = \frac{13 \cdot 2\pi \cdot 50}{0,0139} = 29,38 \cdot 10^4 \text{ км/с.}$$

Теперь можно определить и длину волны электромагнитного поля, распространяющегося по проводам ЛЭП однопроводного исполнения [15, 16]:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{29,38 \cdot 10^4}{650} = 452 \text{ км.}$$

Это длина одной волны электромагнитного поля. При наложении падающей и отраженной волн электромагнитного поля получается результирующая волна этого поля [15; 16]:

$$\lambda = \frac{v}{af} = \frac{29,38 \cdot 10^4}{2 \cdot 650} = 226 \text{ км.}$$

Результат выполненного расчета длины результирующей волны электромагнитного поля подтверждается графическими интерпретациями распределения напряжения и тока вдоль однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения протяженностью 500 км на

частоте 13-й гармонической составляющей, изображенным на рис. 4 и 5.

Эти интерпретации иллюстрируют волновой характер передачи электрической энергии по однородному участку ЛЭП однопроводного исполнения. Длина волны электромагнитного поля в проводе этого участка ЛЭП, судя по рис. 4 и 5, соответствует расчетной величине.

Графические интерпретации распределения напряжения и тока вдоль анализируемого участка ЛЭП (рис. 4 и 5) свидетельствуют о том, что наибольшая пропускная способность для токов на частоте 13-й гармонической составляющей наблюдается в начале этого участка и на участках протяженностью 226 км, 452 км и т. д. Протяженность таких участков, их периодичность и длина волны электромагнитного поля в конечном счете зависят от величины первичных параметров линии электропередачи.

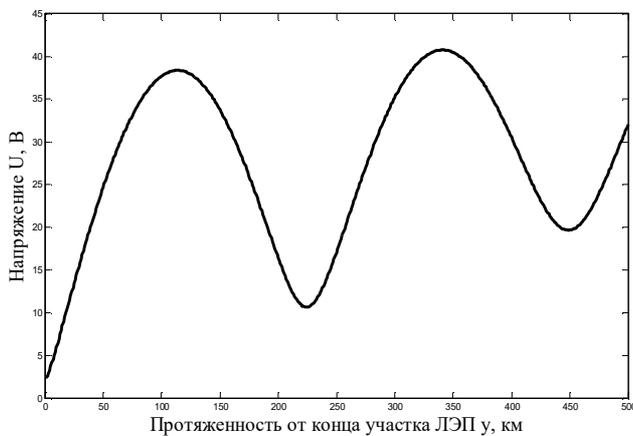


Рис. 4. Графическая интерпретация распределения напряжения от конца однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения на частоте 13-й гармонической составляющей

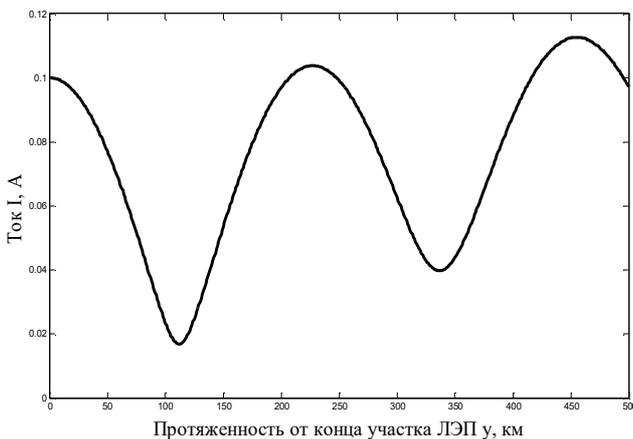


Рис. 5. Графическая интерпретация распределения тока от конца однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения на частоте 13-й гармонической составляющей

Это значит, что для прогнозирования численных значений напряжений и токов на участках ЛЭП различной протяженности, для вычисления длины результирующей волны электромагнитного поля и определения участков ЛЭП с наибольшей пропускной способностью достаточно иметь достоверные сведения о первичных, а также вторичных параметрах линии электропередачи.

Величины напряжений и токов на различных участках ЛЭП зависят от электрической нагрузки. Величину этой нагрузки целесообразно оценивать значениями токов. Распределение токов по однородному участку ЛЭП объективно иллюстрирует распределение волн электромагнитного поля по этому участку. Графическая иллюстрация распределения тока по анализируемому участку ЛЭП приведена на схеме распределения амплитудных значений падающей и отраженной волн электромагнитного поля (рис. 6).

Передачу электрической энергии по ЛЭП можно оценить с помощью передаточной функции линии электропередачи и соответствующих частотных характеристик. Частотные характеристики строятся именно с помощью передаточной функции объекта $K(j\omega)$.

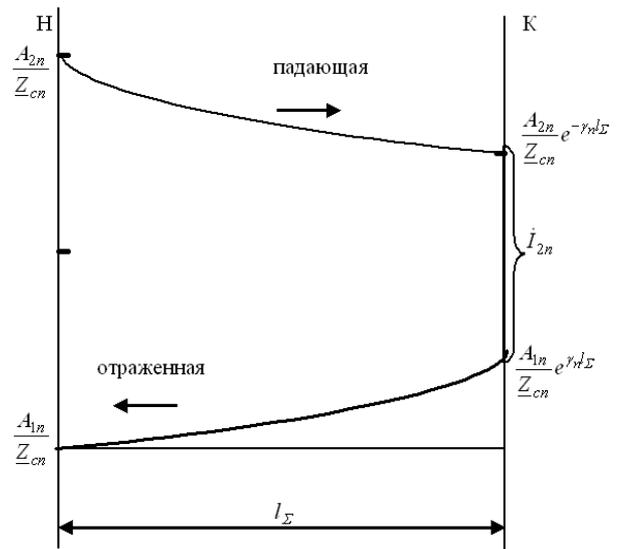


Рис. 6. Схема распределения амплитудных значений падающей и отраженной волн электромагнитного поля по линейному проводу однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения

Передаточная функция объекта $K(j\omega)$ определяется как отношение спектральной плотности выходного сигнала к спектральной плотности входного сигнала:

$$K(j\omega) = \frac{F_2(j\omega)}{F_1(j\omega)},$$

где $F_1(j\omega)$ и $F_2(j\omega)$ — спектральные плотности входного и выходного сигналов.

Спектральная плотность (спектральная функция) сигнала определяется из прямого преобразования Фурье:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt.$$

Если учесть, что до подачи электрической энергии в ЛЭП ни о напряжении, ни о токе речь не идет, то есть при $t < 0$ $f(t) = 0$, то прямое преобразование Фурье для исследуемого объекта переписывается так:

$$F(j\omega) = \int_0^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt. \quad (5)$$

В данном случае следует говорить о передаточной функции по напряжению и передаточной функции по току. Они определяются так:

$$K_U(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)};$$

$$K_I(j\omega) = \frac{I_2(j\omega)}{I_1(j\omega)},$$

где $U_1(j\omega)$ и $U_2(j\omega)$ — спектральные плотности входного и выходного напряжений; $I_1(j\omega)$ и $I_2(j\omega)$ — спектральные плотности входного и выходного токов.

Входные напряжение и ток на частоте n -й гармонической составляющей во времени изменяются по гармоническим законам:

$$u_{1n} = U_{m1n} \sin(n\omega t + \varphi_{u1n});$$

$$i_{1n} = I_{m1n} \sin(n\omega t + \varphi_{i1n}).$$

Спектральные плотности этих величин определяются по уравнению (5):

$$U_1(j\omega) = -\frac{U_{1n}\sqrt{2}}{n\omega} (\cos \varphi_{u1n} - j \sin \varphi_{u1n});$$

$$I_1(j\omega) = -\frac{I_{1n}\sqrt{2}}{n\omega} (\cos \varphi_{i1n} - j \sin \varphi_{i1n}),$$

где U_{1n} и I_{2n} — модули действующих величин напряжения и тока на частоте n -й гармонической составляющей в начале однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения.

Действующие величины выходного напряжения однородного участка ЛЭП однопроводной ЛЭП определяются из первого уравнения системы (4), а выходного тока — из второго уравнения этой системы.

Мгновенное значение выходного напряжения определяется как мнимая составляющая произведения действующего значения этого напряжения и $\sqrt{2}e^{j\omega t}$:

$$u_{2n} = \sqrt{2} \left| \dot{U}_{1n} ch \gamma_n l - \dot{I}_{1n} Z_{cn} sh \gamma_n l \right| \sin(\omega t + \varphi_{u2n}), \quad (6)$$

где φ_{u2n} — аргумент выходного напряжения на частоте n -й гармонической составляющей.

Мгновенное значение выходного тока определяется как мнимая составляющая произведения действующего значения этого тока и $\sqrt{2}e^{j\omega t}$:

$$i_{2n} = \sqrt{2} \left| \dot{I}_{1n} ch \gamma_n l - \frac{\dot{U}_{1n}}{Z_{cn}} sh \gamma_n l \right| \sin(\omega t + \varphi_{i2n}), \quad (7)$$

где φ_{i2n} — аргумент выходного тока на частоте n -й гармонической составляющей.

Спектральные плотности выходных напряжения и тока определяются из уравнения (5) с учетом уравнений (6) и (7):

$$U_2(j\omega) = -\frac{\sqrt{2}}{n\omega} \left| \dot{U}_{1n} ch \gamma_n l - \dot{I}_{1n} Z_{cn} sh \gamma_n l \right| (\cos \varphi_{u2n} - j \sin \varphi_{u2n});$$

$$I_2(j\omega) = -\frac{\sqrt{2}}{n\omega} \left| \dot{I}_{1n} ch \gamma_n l - \frac{\dot{U}_{1n}}{Z_{cn}} sh \gamma_n l \right| (\cos \varphi_{i2n} - j \sin \varphi_{i2n})$$

В таком случае передаточная функция по напряжению однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения приобретает вид:

$$K_U(j\omega) = \frac{\left| \dot{U}_{1n} ch \gamma_n l - \dot{I}_{1n} Z_{cn} sh \gamma_n l \right| (\cos \varphi_{u2n} - j \sin \varphi_{u2n})}{U_{1n} (\cos \varphi_{u1n} - j \sin \varphi_{u1n})},$$

а передаточная функция по току —

$$K_I(j\omega) = \frac{\left| \dot{I}_{1n} ch \gamma_n l - \frac{\dot{U}_{1n}}{Z_{cn}} sh \gamma_n l \right| (\cos \varphi_{i2n} - j \sin \varphi_{i2n})}{I_{1n} (\cos \varphi_{i1n} - j \sin \varphi_{i1n})}.$$

Передаточные функции по напряжению и току представляют собой комплексные величины:

$$K_U(j\omega) = A_U(\omega) e^{j\varphi_u(\omega)};$$

$$K_I(j\omega) = A_I(\omega) e^{j\varphi_i(\omega)}.$$

С помощью этих передаточных функций можно построить частотные характеристики напряжения и тока. Модули передаточных функций $A_U(\omega)$ и $A_I(\omega)$ являются амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ) напряжения и тока, аргументы этих функций — фазо-частотными характеристиками (ФЧХ) напряжения и тока, вещественные составляющие передаточных функций $\text{Re}(A_U(\omega))$ и $\text{Re}(A_I(\omega))$ — вещественно-частотными характеристиками (ВЧХ) напряжения и тока, мнимые составляющие передаточных функций $\text{Im}(A_U(\omega))$ и $\text{Im}(A_I(\omega))$ — мнимыми частотными характеристиками (МЧХ) напряжения и тока.

АЧХ напряжения однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения изображена на рис. 7, АЧХ тока — на рис. 8

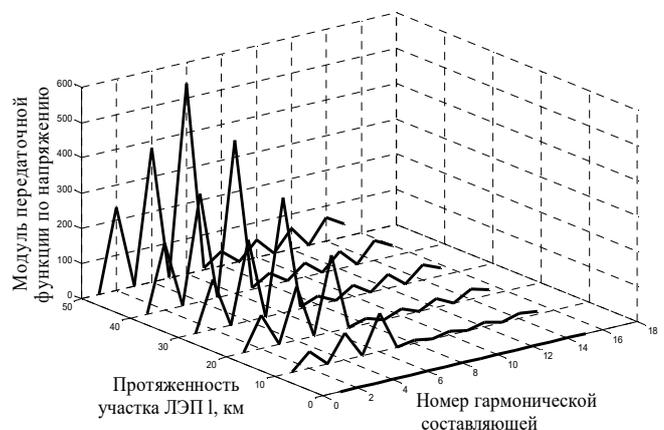


Рис. 7. АЧХ однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения по напряжению

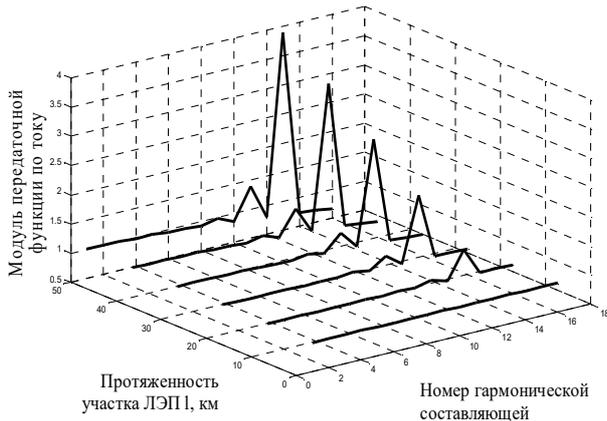


Рис. 8. АЧХ однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения по току

При построении этих АЧХ в качестве начального условия был принят реальный спектральный состав напряжения и тока одного из промышленных регионов страны (Братский район Иркутской области). Своеобразие этих спектральных составов обусловлено участием в системе обеспечения электрической энергией промышленных объектов региона мощных преобразовательных устройств с 12-пульсной схемой выпрямления. Этим фактом объясняется преобладание в спектрах напряжения и тока 11-й и 13-й гармонических составляющих. Причем, судя по АЧХ (рис. 7 и 8), с увеличением протяженности анализируемого участка линии электропередачи уровни этих гармонических составляющих возрастают, а значит, возрастает пропускная способность ЛЭП для токов этих частот.

Выводы

1. В условиях пониженного качества электрической энергии ЛЭП даже сравнительно небольшой протяженности следует рассматривать как линии с распределенными параметрами.

2. Длина волны и скорость электромагнитного поля, распространяющегося по токоведущим частям ЛЭП, много меньше длины волны и скорости распространения этого поля в вакууме. Они определяются коэффициентом фазы, а значит, первичными параметрами соответствующей ЛЭП.

3. В результате выполненных исследований выяснено, что для прогнозирования численных значений напряжений и токов в различных местах однородного участка ЛЭП однопроводного исполнения необходимо иметь сведения не только о величинах напряжения и тока соответствующей частоты в начале или в конце этого участка, но и о его первичных и вторичных параметрах. Отметим, что получение таких сведений часто оказывается непростой задачей, особенно если исследованию подлежит действующая ЛЭП, как правило, обладающая весьма сомнительной однородностью.

Литература

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.

2. Боровиков В.С., Волков М.В., Иванов В.В., Литвак В.В., Мельников В.А., Погонин А.И., Харлов Н.Н. Опыт корпоративного обследования электрических сетей 110 кВ Сибири. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 228 с.

3. Большанин Г.А. Распределение электрической энергии пониженного качества по участкам электроэнергетических систем. В 2 кн. Братск: БрГУ, 2006. Кн. 2. 807 с.

4. Большанин Г.А., Охлопков И.Н., Видерников С.И., Безносос Е.А., Манахов А.В., Зимарев С.А., Алферов М.А. Способ количественной оценки субгармонических и дробных высших гармонических периодически изменяющихся величин: пат. 2210154 Рос. Федерация № 96112228; заявл. 14.06.96; опубл. 20.11.98.

5. Большанин Г.А., Макаренко М.В. Способ автоматизированного активного контроля показателей качества электрической энергии: пат. 2248038 Рос. Федерация. № 2003116562; заявл. 03.06.03; опубл. 10.03.05.

6. Большанин Г.А. Способ активного контроля уровня несинусоидальности напряжения и тока пат. 2262174 Рос. Федерация. № 2003116557; заявл. 03.06.03; опубл. 10.10.05.

7. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.

8. Большанин Г.А. Автоматизированная система активного контроля показателей качества электрической энергии. Братск: БрГУ, 2006. 152 с.

9. Большанин Г.А. Контроль показателей качества электрической энергии. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany. Saarbrücken, 2012. 154 с.

10. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. М.: Изд. дом МЭИ, 2007. 488 с.

11. Большанин Г.А. Математическое моделирование распределения электрической энергии низкого качества по однопроводной линии электропередачи // Математическое моделирование в образовании, науке и производстве: материалы III Междунар. научно-практ. конф. Тирасполь, 17-20 сент., 2003 г. Тирасполь, 2003. С. 346-347.

12. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Особенности распространения электрической энергии по линии электропередачи. Братск: Изд-во БрГУ, 2011. 64 с.

13. Корн Г., Крон Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения, теоремы, формулы. М.: Наука, 1973. 832 с.

14. Большанин Г.А., Большанина Л.Ю. Статическая устойчивость математической модели распределения электрической энергии по однородным участкам ЭЭС четырехпроводного исполнения. // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2008. № 4(36). С. 264-271.

15. Большанин Г.А., Плотников М.П. Длина волны электромагнитного поля в линиях электропередачи // Вестн. Вост.-Сиб. гос. ун-та техн. и управления. 2016. № 4 (61). С. 5-11.

16. Большанин Г.А. Передача электрической энергии по ЛЭП одно-, двух- и трехпроводного исполнения: моногр. Братск: Изд-во БрГУ, 2016. 313 с.

References

1. GOST 32144-2013. Electric Energy. Compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems. М.: Standartinform, 2014. 16 p.

2. Borovikov V.S., Volkov M.V., Ivanov V.V., Litvak V.V., Mel'nikov V.A., Pogonin A.I., Kharlov N.N. Experience in corporate survey of 110 kV electric networks of Siberia. Tomsk: Izd-vo TPU, 2010. 228 p.

3. Bol'shanin G.A. The distribution of electric power quality for low-cal areas of electricity systems. V 2 kn. Bratsk: BrGU, 2006. Kn. 2. 807 p.

4. Bol'shanin G.A., Okhlopkov I.N., Vidernikov S.I., Beznosov E.A., Manakhov A.V., Zimarev S.A., Alferov M.A. A method of quantifying subharmonic-ray and fractional higher harmonic periodically varying quantities: pat. 2210154 Ros. Federatsiya № 96112228; zayavl. 14.06.96; opubl. 20.11.98.
5. Bol'shanin G.A., Makarenko M.V. The process of auto-active control and enshrined indicators of quality of electric energy: pat. 2248038 Ros. Federatsiya. № 2003116562; zayavl. 03.06.03; opubl. 10.03.05.
6. Bol'shanin G.A. Method of active control voltage level nesinusoi-range and current: pat. 2262174 Ros. Federatsiya. № 2003116557; zayavl. 03.06.03; opubl. 10.10.05.
7. Zhezhelenko I.V. Higher harmonics in the power supply systems of industrial enterprises. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Energoatomizdat, 1984. 160 p.
8. Bol'shanin G.A. Automated system of active monitoring of indicators of quality of electric energy. Bratsk: BrGU, 2006. 152 p.
9. Bol'shanin G.A. Monitoring of indicators of quality of electric energy. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Germany. Saarbrücken, 2012. 154 p.
10. Ryzhov Yu.P. Long-distance transmission of EHV. M.: Izd. dom MEI, 2007. 488 p.
11. Bol'shanin G.A. Mathematical modeling of distribution of electric energy of low quality on a single transmission line // Matematicheskoe modelirovanie v obrazovanii, nauke i proizvodstve: materialy III Mezhdunar. nauchno-prakt. konf. Tiraspol', 17-20 sent., 2003 g. Tiraspol', 2003. P. 346-347.
12. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Features of distribution of electric energy through power lines. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2011. 64 p.
13. Korn G., Kron T. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: definitions, theorems, formulas. M.: Nauka, 1973. 832 p.
14. Bol'shanin G.A., Bol'shanina L.Yu. Static stability of mathematical models of electric power distribution for the homogeneous parts of four-power system performanc // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2008. № 4 (36). P. 264-271.
15. Bol'shanin G.A., Plotnikov M.P. The length of the electromagnetic field waves in transmission lines // ESSUTM Bulletin. 2016. № 4 (61). P. 5-11.
16. Bol'shanin G.A. Electric power transmission on power lines one-, two- and three-wire performance: monogr. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2016. 313 p.