

TALLINNA POLÜTEHNILISE  
INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

№ 403

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

СБОРНИК СТАТЕЙ  
VI

ТАЛЛИН 1976



№. 6.7  
TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

№ 403

1976

---

УДК 621.31

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

СБОРНИК СТАТЕЙ

VI

ТАЛЛИН 1976



УДК 621.311.001

М.Э. Кээл

О КОРРЕКТИРОВАНИИ ПЛАНОВ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ВЕРОЯТНОСТНО-  
ОПРЕДЕЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ

При управлении электроэнергетическими системами (ЭЭС) необходимо их режимы заранее планировать. С уменьшением времени упреждения<sup>х</sup> повышается точность исходной информации для планирования: она становится более детальной, кроме того, уточняются вероятностные характеристики случайных величин, причем часть вероятностно-определенной информации может стать детерминированно-определенной.

Задача оптимального корректирования планов режима в условиях детерминированно-определенной исходной информации рассматривается в [1,2]. Данная статья посвящена корректированию планов активной мощности, определенных по критерию минимума математического ожидания суммарных затрат [3]. В основу принята модифицированная задача оптимального корректирования. Тогда критерием корректирования является минимум математического ожидания модифицированных затрат. Выполнение ограничений в виде уравнений при этом должно быть обеспечено в среднем. Ограничивающие условия в виде неравенств (для межсистемных перетоков, нагрузок элементов ЭЭС и т.д.) можно учитывать с определенной вероятностью.

Предположим, что плановый период разбит на  $n$  дискретных интервалов, а за каждый интервал времени значения неслучайных, в том числе плановых величин, и вероятностные характеристики случайных величин являются постоянными.

<sup>х</sup> Временем упреждения принято называть интервал времени, отделяющий момент прогнозирования величин от момента их наступления.

Существенными случайными факторами в процессе управления режимом, учет которых необходим и при корректировании, являются отклонения фактических значений активных мощностей от плановых [3]. Для учета случайных отклонений активных мощностей при корректировании плана разложим генерируемые активные мощности  $P$  на следующие слагаемые:

$$P_{ik} = \bar{P}_{ik} + \overset{\circ}{P}_{ik} + \Delta P_{ik}, \quad (I)$$

где  $\bar{P}_{ik}$ ,  $\overset{\circ}{P}_{ik}$  и  $\Delta P_{ik}$  — соответственно векторы плановых значений, корректировок плана и отклонений фактических значений мощности от корректированного плана  $i$ -го элемента ЭЭС в  $k$ -ом интервале времени.

Отклонения мощности  $\Delta P$  могут быть рассмотрены как случайные величины, вероятностные характеристики которых определяются на основе статистических данных о прошлых режимах. Условные вероятностные законы распределения величин  $\Delta P$  считаем непрерывно изменяющимися и зависящими лишь от времени упреждения  $\tau_k$ .

Для простоты изложения выводим условия оптимальности корректирования плана распределения активных мощностей между ТЭС. Рассмотрим задачу оптимального корректирования ранее определенного плана в следующей ситуации:

а) существующий план распределения активных нагрузок  $\bar{P}_{1k}^*, \bar{P}_{2k}^*, \dots, \bar{P}_{nk}^*$  ( $k=1, \dots, s$ ) определен с учетом потерь активной мощности в сети  $\Pi_k^*$  ( $k=1, \dots, s$ );

б) необходимая исходная информация для первого интервала времени  $t$  корректируемого периода уточнялась в части узловых мощностей потребления;

в) информация о следующих интервалах времени уточнялась лишь в части суммарной мощности потребления  $P_n$ .

В таких условиях обычно имеет смысл корректирование плана режима на интервал времени  $t$  с учетом потерь активной мощности в сети, а определение корректировок к плану на интервалы времени  $t+1, \dots, s$  можно произвести без учета потерь мощности в сети.

Вероятностная постановка задачи сводится тогда к решению следующей задачи:

$$\begin{aligned} & \min_{\bar{P}} \left\{ M \sum_{i=1}^n B_{it} (\bar{P}_{it}^* + \dot{P}_{it} + \Delta P_{it}) + \right. \\ & + \sum_{k=t+1}^s \left[ M \sum_{i=1}^n B_{ik} (\bar{P}_{ik}^* + \dot{P}_{ik} + \Delta P_{ik}) - \left( \frac{\partial M B_{ik} (\bar{P}_{ik}^* + \dot{P}_{ik} + \Delta P_{ik})}{\partial \bar{P}_{ik}} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \mu_k^* \frac{\partial (M P_{nk}^* - \sum_{i=1}^n \bar{P}_{ik}^*)}{\partial \bar{P}_{ik}} \right) \cdot (\dot{P}_{ik} + \Delta P_{ik}) \right] \left. \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

при следующих ограничениях

$$M P_{nt} + M \Pi_t - \sum_{i=1}^n (\bar{P}_{it}^* + \dot{P}_{it}) = 0, \quad (3)$$

$$M \Delta P_{nk} - \sum_{i=1}^n \dot{P}_{ik} = 0, \quad k = t+1, \dots, s, \quad (4)$$

$$\bar{P}_{ik}^- \leq \bar{P}_{ik}^* + \dot{P}_{ik} \leq \bar{P}_{ik}^+, \quad i = 1, \dots, n, \quad k = t, \dots, s, \quad (5)$$

где  $M$  — символ математического ожидания;

$B$  — расход топлива ТЭС;

$n$  — число ТЭС;

$\mu$  — множитель Лагранжа;

$\chi^*$  — значение параметра  $\chi$  в модели планирования;

$P_n$  — новое значение прогноза суммарной активной нагрузки ЭЭС;

$\Delta P_n$  — уточнение суммарной нагрузки ЭЭС;

$\bar{P}_k^- = P_k^- - \inf \Delta P_k$ ,  $\bar{P}_k^+ = P_k^+ - \sup \Delta P_k$  — предельные значения вектора  $\langle \bar{P}_k^* + \dot{P}_k \rangle$ .

На основе теории нелинейного программирования получим следующие необходимые условия оптимальности: условия (3)...

(5) и

$$\mu_t = \frac{\bar{b}_{it} (\bar{P}_{it}^* + \dot{P}_{it})}{1 - \bar{\sigma}_{it}} = \dots = \frac{\bar{b}_{nt} (\bar{P}_{nt}^* + \dot{P}_{nt})}{1 - \bar{\sigma}_{nt}}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mu_k &= \bar{b}_{ik} (\bar{P}_{ik}^* + \dot{P}_{ik}) - [\bar{b}_{ik} (\bar{P}_{ik}^*) - \mu_k^*] = \dots = \\ &= \bar{b}_{nk} (\bar{P}_{nk}^* + \dot{P}_{nk}) - [\bar{b}_{nk} (\bar{P}_{nk}^*) - \mu_k^*], \\ & \quad k = t+1, \dots, s. \end{aligned} \quad (7)$$

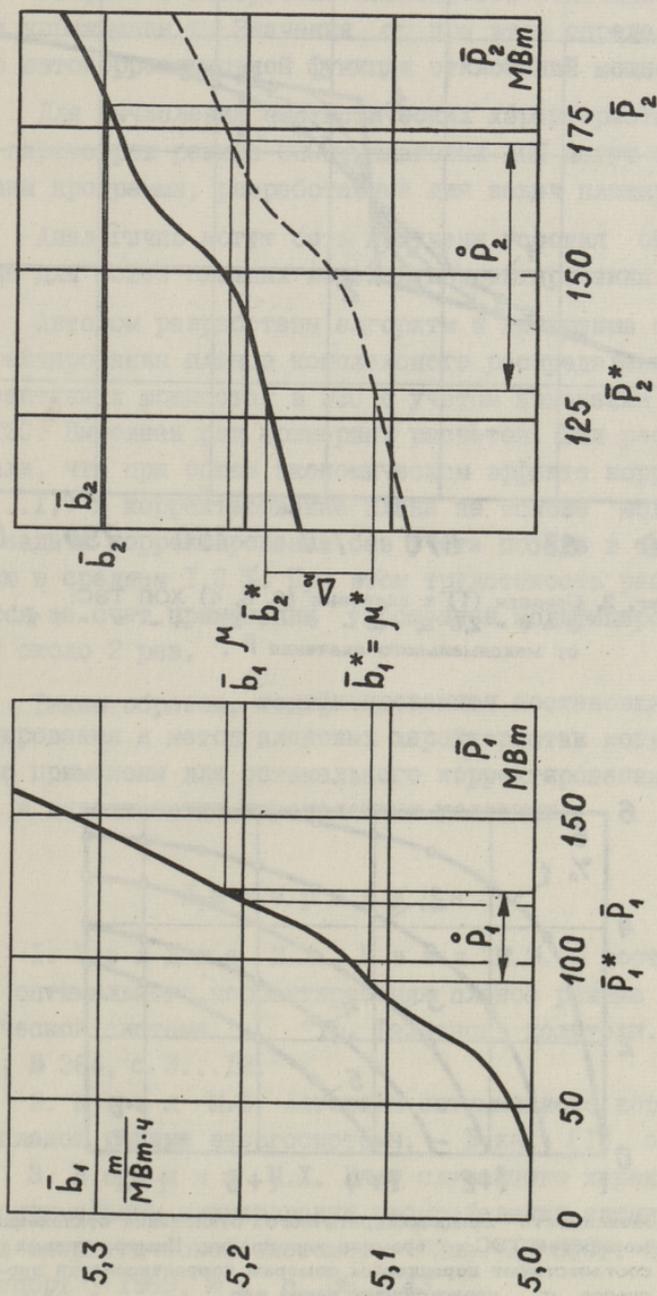
Здесь  $\bar{b}_{ik} = \partial \bar{V}_{ik} / \partial \bar{P}_{ik}$ ,  $\bar{\sigma}_{ik} = \partial \bar{P}_k / \partial \bar{P}_{ik}$  - плановые характеристики относительных приростов (ХОП) затрат ТЭС и сетевых потерь активной мощности, причем  $\bar{V}_{ik} = M V_{ik} (\bar{P}_{ik}^* + \dot{P}_{ik} + \Delta P_{ik})$  и  $\bar{P}_k = M P_k (L_k + \Delta L_k, \bar{P}_k^* + \dot{P}_k + \Delta P_k)$ ;  $L_k, \Delta L_k$  - векторы прогнозов и отклонений мощностей потребления.

Из выражений (7) видно, что при  $k > t$  условием оптимальности является равенство приращений плановых относительных приростов затрат ТЭС.

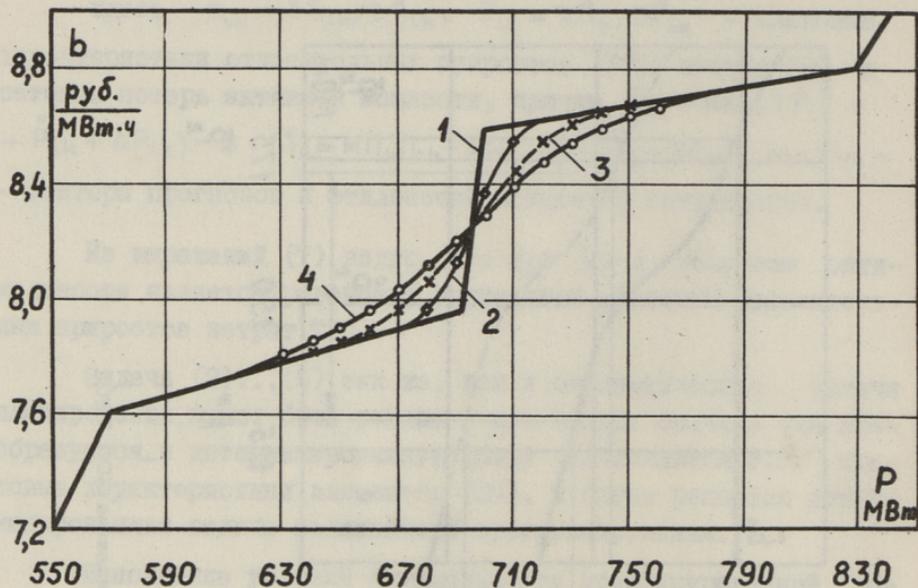
Задача (2)...(5) так же, как и стохастические задачи планирования, может быть решена в два этапа: сначала она преобразуется в детерминированную форму (вычисляются т.н. плановые характеристики элементов ЭЭС), а потом решается детерминированная задача нелинейного программирования.

Выполнение условий оптимальности модифицированной упрощенной задачи оптимального корректирования можно представить и графически. При этом вместо ХОП электростанций используются смещенные на величины  $\Delta_{ik}$  ( $\Delta_{ik} = \bar{b}_{ik}(\bar{P}_{ik}^*) - \mu_k^*$ ) ХОП. Величины  $\Delta_{ik}$  называем коэффициентами связи моделей планирования и корректирования. На фиг. 1 показаны исходные ХОП (сплошная линия), смещенная ХОП (пунктирная линия) и оптимальные корректировки плана. При этом использованы следующие обозначения:  $\bar{P}_1^*, \bar{P}_2^*$  - исходный план распределения активных нагрузок, определенный с учетом потерь в сети ( $\partial \bar{P}^* / \partial \bar{P}_1 = 0$ ,  $\partial \bar{P}^* / \partial \bar{P}_2 = -0,0140$ ),  $\bar{P}_1, \bar{P}_2$  - оптимальный план, определенный с учетом потерь в сети ( $\partial \bar{P} / \partial \bar{P}_1 = 0$ ,  $\partial \bar{P} / \partial \bar{P}_2 = -0,0192$ ) после изменения нагрузки системы на  $\Delta P_n$ ,  $\dot{P}_1, \dot{P}_2$  - оптимальные корректировки к исходному плану, определенные из условий равенства относительных приростов при смещенной ХОП (условие (7)).

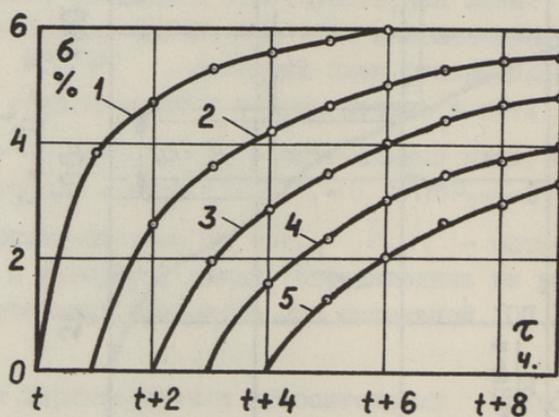
Плановые характеристики относительных приростов затрат [3], а также коэффициенты  $\Delta_{ik}$ , зависят от законов распределения отклонений активных мощностей  $\Delta P_{ik}$ . Изменение плановой характеристики относительных приростов одной ТЭС, в зависимости от значений среднеквадратичных отклонений  $\sigma$  случайных отклонений активных мощностей, показано на фиг. 2.



Фиг. 1. Исходные и смещенная ХОП ТЭС.



Фиг. 2. Средняя (1) и плановые (2, 3, 4) ХОП ТЭС:  
 2 -  $\sigma = 2,5\%$ , 3 -  $\sigma = 4\%$ , 4 -  $\sigma = 7\%$   
 от максимального значения  $\bar{P}$ .



Фиг. 3. Зависимость среднеквадратичного отклонения отклонений мощностей ТЭС от времени упреждения. Номера кривых соответствуют порядковым номерам корректирующих прогнозов  $\sigma$ , происходящих через час.

На фиг. 3 изображена зависимость величины  $\sigma$  от времени упреждения  $\tau$ . Значения  $\sigma$  при этом определены на основе автокорреляционной функции отклонений мощностей ТЭС.

Для вычисления статистических характеристик отклонений параметров режима ЭЭС и плановых ХОП могут быть использованы программы, разработанные для задач планирования.

Аналогично могут быть получены условия оптимальности также для более сложных моделей корректирования.

Автором разработаны алгоритм и программа оптимального корректирования планов комплексного распределения активных и реактивных мощностей в ЭЭС с учетом изменения напоров воды ГЭС. Выполнен ряд примерных расчетов. Эти расчеты показывали, что при общем экономическом эффекте корректирования 1,5...1,7 % корректирование плана на основе модифицированной задачи корректирования без учета потерь в сети дает экономию в среднем 1,2 %. При этом трудоемкость расчетов уменьшается за счет применения упрощенной модифицированной задачи около 2 раз.

Таким образом, модифицированная постановка задачи корректирования и метод плановых характеристик могут быть успешно применены для оптимального корректирования планов режима в вероятностно-определенных условиях.

### Л и т е р а т у р а

1. В а л д м а М.Х., К э э л М.Э. О постановке задач оптимального корректирования планов режима электроэнергетической системы. - "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", 1974, № 364, с. 3...12.

2. К э э л М.Э. Алгоритм оптимального корректирования планов режима энергосистемы. - В кн.: [1], с. 13...17.

3. В а л д м а М.Х. Учет случайного характера режима при оптимальном планировании распределения активных нагрузок в энергетической системе. - "Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт", 1969, № 6, с. 36...43.

M. Keel

About Correction of Active Power Plans of  
Electrical Power Systems under Probabilistic  
Information

S u m m a r y

This article describes a modification of the method of optimal correction of active power plans. Total average operating cost is the function to be minimized.

УДК 621.311.22.001

М.Х.Валдма, Л.К.Вийлуп, М.Э.Кээл,  
К.Ю. Мёллер, Х.Э.-Й. Таммоя

ПРОГРАММА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА И РАСЧЕТА ВХОД-ВЫХОД  
ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С УЧЕТОМ  
СЛУЧАЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА

Одной из сложных задач диспетчерского управления электроэнергетической системой (ЭЭС), в решении которых применение ЦВМ дает ощутимый экономический эффект, является оптимизация режима внутри тепловой электростанции (ТЭС) и расчет ее вход-выход характеристик для задач оптимизации режима ЭЭС. В настоящее время на решение указанной задачи с помощью ЦВМ уделяется много внимания [1]. В данном сообщении приводится краткое описание программы ОПТЭС/76<sup>I</sup>, разработанной на кафедре электрических систем Таллинского политехнического института.

Программа ОПТЭС/76 предназначена для автоматизации расчетов определения оптимального режима внутри ТЭС в цикле краткосрочного управления и расчета вход-выход характеристик ТЭС в циклах краткосрочного и долгосрочного управления. Программа может быть применена как для блочной ТЭС, так и для ТЭС с общим паропроводом, включая теплоэлектроцентрали (ТЭЦ). Она позволяет решить следующие диспетчерские задачи: 1) расчет вход-выход характеристик энергоблоков и станции при заданном составе работающих агрегатов, а также вычисленные диаграммы оптимальных нагрузок агрегатов; 2) расчет оптимальных графиков нагрузки агрегатов на заданный период; 3) выбор оптимального состава агрегатов без учета пусковых

<sup>I</sup> Программа ОПТЭС/76 разработана по заказу Эстонглав-энерго.

расходов; 4) расчет средней характеристики относительных приростов (ХОП) затрат станции для задач долгосрочного управления режимом. При этом программа ОПТЭС/76 позволяет: 1) учитывать случайные колебания параметров; 2) осуществить корректировку характеристик агрегатов по разным методам; 3) учитывать расход электроэнергии на собственные нужды; 4) учитывать потери от дросселирования пара в регулирующих клапанах турбин; 5) учитывать ограниченные пропускные способности паропроводов; 6) оптимизировать распределение тепловых нагрузок между отборами теплофикационных турбин.

Программа составлена на алгоритмическом языке ФОРТРАН (версия Ф-20). Она представляет собой сложную комплексную программу, состоящую из 9 модулей, каждый из которых в свою очередь состоит из многих подпрограмм. Условия и варианты задач варьируемы в очень широких пределах. В результате этого программа позволяет решить свыше 16000 разных вариантов диспетчерских задач. Конкретный вариант задачи задается программе кодом задачи, состоящим из 9 чисел. Для повышения удобств применения программы создан банк информации (БИ) условно-постоянной информации (на магнитной ленте).

Содержание модулей программы следующее. Первые 2 модуля разработаны для обслуживания БИ. Модуль 1 осуществляет ввод информации в БИ. Модуль 2 служит для печати информации, находящейся в БИ.

Модуль 3 позволяет корректировать базисные характеристики тепловых потерь котлоагрегатов и вычисляет ХОП затрат котлоагрегатов. Корректирование базисных характеристик тепловых потерь может быть произведено: а) по отклонениям параметров режима котла (температура холодного воздуха, воздуха перед воздухоподогревателем, уходящих газов, питательной воды и топлива, коэффициенты избытка воздуха в топке и в уходящих газах, влажность и зольность топлива); б) на основе вероятностной информации об отклонениях вышеуказанных параметров; в) по времени работы после ремонта. ХОП затрат котлоагрегатов выражаются в виде полиномов до третьей степени.

Модуль 4 позволяет корректировать базисные характеристики турбогенераторов и выражает их расходные характеристики в виде кусочно-линейных полиномов. Корректирование характеристик производится: а) по значению температуры охлаждающей и питательной воды; б) по точкам открытия регулирующих клапанов; в) по значению температуры и давления пара; г) на основе вероятностной информации об отклонениях параметров пара. Методика модулей 3 и 4 более подробно описана в [2].

Модуль 5 производит расчет вход-выход характеристик энергоблоков и блочной ТЭС. Вычисляются 4 характеристики для ТЭС: 1) ХОП затрат; 2) ХОП расхода топлива; 3) расходная характеристика; 4) режимная характеристика удельных затрат.

Производится учет случайных колебаний нагрузок агрегатов. Для учета случайных колебаний нагрузки станции вычисляются плановые ХОП затрат и расхода топлива станции. Производится их кусочно-линейная аппроксимация. Кроме того, данным модулем вычисляются диаграммы зависимостей оптимальных нагрузок агрегатов от нагрузки и относительного прироста затрат станции.

Модуль 6 вычисляет все вышеперечисленные характеристики для ТЭС с общим паропроводом. Особенностью является здесь то, что учитываются ограничения по пропускным способностям паропроводов. Производится комплексная оптимизация распределения электрических мощностей и тепловых нагрузок теплофикационных турбин. Методика модулей 5 и 6 описана в [3].

Модуль 7 выполняет расчеты оптимальных графиков нагрузки агрегатов на заданный предстоящий период. Исходными данными являются график нагрузки станции и характеристики, вычисленные модулями 5 и 6. Оптимальная загрузка турбоагрегатов и энергоблоков производится по порядку возрастания их относительных приростов расхода, оптимальное распределение нагрузок между котлоагрегатами - по принципу равенства относительных приростов с учетом расхода электроэнергии на собственные нужды и режимных ограничений.

Модуль 8 позволяет определить оптимальные составы работающих агрегатов на заданный период. Исходными данными яв-

ляются: а) график нагрузки ТЭС; б) график минимально допустимого резерва; в) состав агрегатов, находящихся в ремонте. Оптимальные составы определяются по методике, базирующейся на [4]. При этом пусковые расходы не учитываются.

Модуль 9 предназначен для прогнозирования ХОП затрат ТЭС для расчетов долгосрочного планирования режимов ЭЭС. При выполнении расчетов долгосрочного планирования режима ЭЭС расчетными дискретными интервалами времени выбираются обычно недели и месяцы. В течение указанных интервалов на ТЭС работает много разных составов. В качестве представительной ХОП затрат ТЭС в таком случае может быть принята средняя ХОП затрат. Модуль 9 вычисляет среднюю ХОП затрат ТЭС. Считаются заданными множество возможных составов агрегатов в расчетном интервале и вероятности их реализации или предполагаемые периоды работы каждого состава. Расчет ХОП затрат для каждого заданного состава может быть произведен с учетом случайных колебаний параметров и с корректировкой характеристик агрегатов.

Программа ОПТЭС/76 весьма универсальна. Она позволяет решить ряд основных задач оптимизации режима тепловых электростанций, а также рассчитать их вход-выход характеристики. Модульная структура программы и широкая варьируемость исходных условий решаемых задач позволяет использовать ее не только для эксплуатационных расчетов, а также в исследовательских целях. В будущем целесообразно продолжать работу по дальнейшему усовершенствованию программы.

#### Л и т е р а т у р а

1. Горнштейн В.М., Пономарев А.В. Методика расчета оптимального режима и характеристик тепловой электростанции. - "Труды ВНИИЭ", 1972, вып. 40, с.31... 51.

2. Валдма М.Х., Вийлуп Л.К., Мёллер К.Ю., Таммоя Х.Э.-Й. Об оценивании вход-выход характеристик агрегатов тепловой электростанции. См. наст. сб., с. 17.

3. В а л д м а М.Х., Т а м м о я Х.Э.-Й. Методика оптимизации распределения нагрузок между агрегатами и расчета вход-выход характеристик тепловой электростанции. См. наст. сб., с. 29.

4. М а р к о в и ч И.М. Критерии выгодности останова и пуска агрегатов в энергосистеме. - "Электричество", 1962, № 7, с. 21...23.

M. Valdma, L. Viilup, M. Keel,  
K. Möller, H. Tammoja

Program for Calculating Optimal State and  
Input-Output Characteristics of a Thermal Plant  
with Taking into Account Random Factors

S u m m a r y

The digital computer program (FORTRAN) is described here. It is possible to calculate: 1) corrections for characteristics of boilers and turbines, 2) optimal load plans for boilers and turbines, 3) optimal composition of units, 4) input-output characteristics, 5) average characteristics of the plant.



УДК 621.311.22.001

М.Х. Валдма, Л.К. Вийлуп,  
К.Д. Мёллер, Х.Э.-И. Таммоя

ОБ ОЦЕНИВАНИИ ВХОД-ВЫХОД ХАРАКТЕРИСТИК  
АГРЕГАТОВ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

I. Введение. Для оптимизации режима тепловой электростанции (ТЭС) и расчета её вход-выход характеристик следует иметь вход-выход характеристики агрегатов, а именно расходные характеристики и характеристики относительных приростов котлов, турбин, а также механизмов собственных нужд ТЭС.

Вопросам определения характеристик агрегатов электрических станций уделяется в настоящее время значительное внимание [1,2,3]. Ниже описывается методика оценивания вход-выход характеристик агрегатов ТЭС, использованная в программе ОПТЭС/76 [4]. Эти характеристики меняются в зависимости от значений локальных параметров режима агрегатов, а также по мере изменения их состояния в процессе эксплуатации и в результате ремонтов. Кроме того, ряд локальных параметров режима агрегатов имеет случайные колебания [5]. Вход-выход характеристики агрегатов имеют следующий общий вид:

1) расходная характеристика (РХ)

$$G = f(Y, x_1, \dots, x_r, \tau); \quad (I.1)$$

2) характеристика относительных приростов (ХОП)

$$g = \frac{\partial G}{\partial Y}. \quad (I.2)$$

Здесь  $G$  - входная и  $Y$  - выходная мощности агрегата;  
 $x_1, \dots, x_r$  - локальные режимные параметры, влияющие на характеристику агрегата;

$\tau$  - время работы агрегата после ремонта.

Время  $\tau$  в (I.I) учитывает изменение состояния агрегатов в процессе эксплуатации в результате загрязнения их теплообменных поверхностей и износа. При оптимальном распределении нагрузки между агрегатами управляемой является только выходная мощность  $\gamma$ .

Так как в настоящее время отсутствуют общие зависимости вида (I.I), то целесообразно разделить учет влияния режимных параметров  $x_1, \dots, x_r$  и времени  $\tau$ , тем более, что изменения состояния агрегата отражаются и в изменении значений части режимных параметров.

2. Характеристики котлоагрегатов. Программа ОПТЭС-76 предусматривает: 1) расчет РХ и ХОП котлов; 2) корректирование базисных характеристик тепловых потерь а) по отклонениям локальных параметров режима котла, б) на основе вероятностной информации об этих отклонениях, в) по времени работы после ремонта; 3) расчет ХОП собственных нужд; 4) аппроксимацию характеристик полиномами до третьей степени.

2.1. Аппроксимация характеристик полиномами. Вход-выход характеристики котлоагрегатов и собственных нужд, а также исходные характеристики их расчета используются в программе ОПТЭС/76 в виде полиномов до третьей степени. Для этого разработана специальная подпрограмма аппроксимации характеристик.

Исходные данные представляются в табличной форме с указанием минимального и максимального значений аргумента и степени аппроксимирующего полинома.

Характеристика аппроксимируется методом наименьших квадратов с учетом весовых коэффициентов. Обеспечивается выпуклость и монотонно возрастающий характер аппроксимирующих полиномов.

2.2. Расчет РХ и ХОП котлоагрегатов. РХ определяются по общеизвестному методу обратного баланса (рассматриваются ТЭС, сжигающие твердое топливо).

Исходными являются базисные характеристики тепловых потерь в котле  $q_{ij}^B(Q_{kj})$ , выраженных в процентах от

расхода топлива  $B$  в табличной форме при одних и тех же значениях тепловой нагрузки котла  $Q_{kj}$ , причем  $j = I, \dots, n$  ( $n \leq 10$ ), а  $i = 2, \dots, 6$  (потери  $q_2$  - с уходящими газами,  $q_3$  - от химического и  $q_4$  - от механического недожига,  $q_5$  - в окружающую среду,  $q_6$  - с физическим теплом шлака).

Так как целесообразно иметь потери  $q_i$  в относительных единицах от тепловой нагрузки  $Q_k$ , производится пересчет потерь по формуле:

$$q_{ij}^{Q_k} = \frac{0,01 q_{ij}^B}{7(1 - 0,01 \sum_{i=2}^6 q_{ij}^B)}, \quad i = 2, \dots, 6, j = 1, \dots, n. \quad (2.1)$$

Значения  $q_{ij}^{Q_k}$  аппроксимируются полиномами третьей степени (верхний индекс  $Q_k$  в дальнейшем опускается):

$$q_i(Q_k) = a_{i0} + a_{i1} Q_k + a_{i2} Q_k^2 + a_{i3} Q_k^3, \quad (2.2)$$

$$i = 2, \dots, 6, \quad Q_{kmin} \leq Q_k \leq Q_{kmax},$$

где  $a_{i0}, \dots, a_{i3}$  - коэффициенты полиномов.

РХ котлоагрегата

$$B = \frac{Q_k + q_v Q_k}{7}, \quad (2.3)$$

где  $q_v$  - суммарные относительные потери (от тепловой нагрузки котла  $Q_k$ ),

$$q_v = \sum_{i=2}^6 q_i = a_0 + a_1 Q_k + a_2 Q_k^2 + a_3 Q_k^3. \quad (2.4)$$

ХОП расхода условного топлива выражается полиномом третьей степени:

$$b = \frac{dB}{dQ_k} = \frac{1}{7}(1 + a_0 + 2a_1 Q_k + 3a_2 Q_k^2 + 4a_3 Q_k^3), \quad (2.5)$$

$$Q_{kmin} \leq Q_k \leq Q_{kmax}.$$

2.3. Корректирование базисных характеристик потерь по отклонению локальных режимных параметров производится умножением базисного полинома потерь  $q_i(Q_k)$  (2.2) на корректирующий коэффициент  $k_i$  [10]:

$$q_i = k_i q_i(Q_k), \quad (2.6)$$

где

$$k_i = 1 + \sum_{j=1}^r \Delta q_{ij}. \quad (2.7)$$

Здесь  $\Delta q_{ij}$  - корректировка  $i$ -й потери по отклонению  $j$ -го параметра  $x_j$ ;  
 $r$  - количество учитываемых режимных параметров.

В настоящее время имеются только линейризованные корректирующие зависимости. Однако учитывая их возможное уточнение в будущем, они принимаются в виде полинома второй степени:

$$\Delta q_{ij} = a_{1i} \Delta x_{ij} + a_{2i} \Delta x_{ij}^2, \quad j = 1, \dots, r, \quad (2.8)$$

где  $a_{1i}, a_{2i}$  - коэффициенты полинома;  
 $\Delta x_{ij}$  - отклонение  $j$ -го параметра, влияющего на  $i$ -ую тепловую потерю, определяемое как разность текущего и базисного (нормативного) значения параметра  $x_j$ .

В программе ОПТЭС/76 имеется возможность корректирования тепловых потерь с физическим теплом шлака  $q_6$  по отклонению зольности топлива  $\Delta A_p$  и потерь с уходящими газами  $q_2$  по следующим параметрам: отклонение температуры холодного воздуха  $\Delta t_{хв}$ , воздуха после калорифера  $\Delta t_{кф}$ , уходящих газов  $\Delta t_{ух}$ , питательной воды  $\Delta t_{пв}$  и топлива  $\Delta t_{тл}$ ; отклонение коэффициента избытка воздуха в топке  $\Delta \alpha_{пн}$  и в уходящих газах  $\Delta \alpha_{ух}$ ; отклонение зольности  $\Delta A_p$  и влажности  $\Delta W_p$  топлива.

2.4. Корректирование базисных характеристик потерь на основе вероятностной информации о локальных режимных параметрах. Из стохастической постановки задачи оптимизации распределения нагрузки между агрегатами ТЭС непосредственно вытекает, что случайность локальных режимных параметров не приносит с собой никаких особенностей в методику распределения нагрузки между агрегатами. Только вместо фактических характеристик, которые являются неизвестными, следует использовать средние характеристики [6].

Средние характеристики тепловых потерь в котлоагрегате

$$Mq = Mq(Q_k, x_1, \dots, x_r), \quad (2.9)$$

где  $M$  - символ математического ожидания.

Далее

$$Mq(Q_k) = \int \dots \int_R q(Q_k, x_1, \dots, x_r) f_r(x_1, \dots, x_r) dx_1 \dots dx_r, (2.10)$$

где  $R$  - область возможных значений локальных режимных параметров  $x_1, \dots, x_r$ ;

$f_r$  -  $r$ -мерная совместная плотность распределения.

Так как в реальных условиях весьма затруднительно получить плотность  $f_r(x_1, \dots, x_r)$ , то характеристики потерь вычисляются по следующей формуле:

$$Mq(Q_k) = q(Q_k, Mx_1, \dots, Mx_r) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^r \frac{\partial^2 q(\cdot)}{\partial x_i^2} D_{x_i} + \frac{1}{2} \sum_{i < j} \frac{\partial^2 q(\cdot)}{\partial x_i \partial x_j} K_{ij}, (2.11)$$

где  $D_{x_i}$  - дисперсия параметра  $x_i$ ;

$K_{ij}$  - корреляционный момент параметров  $x_i, x_j$ .

Вероятностная информация, входящая в (2.11), может быть оценена статистическим анализом локальных режимных параметров котлоагрегата [5].

Программа ОПТЭС/76 предусматривает возможность корректировки средних характеристик тепловых потерь котлоагрегата по выражению (2.11).

2.5. Корректирование базисных характеристик потерь по времени работы после ремонта. Изменение состояния котлоагрегата в межремонтный период работы (загрязнение теплообменных поверхностей и износ) представляет собой кумулятивный стохастический процесс. Так как этот процесс происходит под воздействием большого количества факторов (случайное залипание продуктов горения на поверхности, а также износ, обусловленный этими продуктами), то представляется обоснованным описание изменения тепловых потерь с уходящими газами  $q_2$  по времени работы после ремонта  $\tau$  с использованием функции нормального распределения  $F(\tau, m, \sigma)$ .

В программе ОПТЭС/76 описывается процесс изменения потерь  $q_2(Q_k, \tau)$  изменением коэффициентов полинома  $q_2(Q_k)$  (см. выражение 2.2)  $a_0, \dots, a_3$  по следующему закону:

$$a_i(\tau) = A_{0i} + A_{1i} F(\tau, m, \sigma), \quad i = 0, \dots, 3, \quad (2.12)$$

где  $m$  — момент времени, когда  $a_i(\tau)$  имеет максимальную скорость изменения;

$\sigma$  — коэффициент вариации скорости.

Постоянные коэффициенты  $A_0$  и  $A_1$  в (2.12) определяются из (2.12) по заданным значениям коэффициентов  $a_i(\tau_1)$  и  $a_i(\tau_2)$  в начале  $\tau_1$  и конце  $\tau_2$  периода работы.

Тогда

$$a_i(\tau) = \frac{a_i(\tau_1)F(\tau_2, m, \sigma) - a_i(\tau_2)F(\tau_1, m, \sigma)}{F(\tau_2, m, \sigma) - F(\tau_1, m, \sigma)} - \frac{a_i(\tau_2) - a_i(\tau_1)}{F(\tau_2, m, \sigma) - F(\tau_1, m, \sigma)} F(\tau, m, \sigma), \quad (2.13)$$

$$i = 0, \dots, 3; \quad \tau_1 \leq \tau \leq \tau_2.$$

Задание в (2.13) значений  $m$ ,  $\tau_1$  и  $\tau_2$  определяет интервал функции нормального распределения, используемой для описания процесса  $a_i(\tau)$ , а значение  $\sigma$  определяет скорость изменения  $a_i(\tau)$  в данном интервале.

В программе ОПТЭС/76 функция  $F(\tau, m, \sigma)$  вычисляется по её разложению в ряд [7].

Выражение (2.13) описывает процесс изменения потерь с уходящими газами  $q_2(Q_k, \tau)$ , обусловленный повышением температуры уходящих газов в результате загрязнения поверхностей нагрева и увеличением присосов воздуха в результате износа. При этом возможно дополнительное корректирование потерь  $q_2$  по всем остальным параметрам, перечисленным в п. 2.3.

Выражение, аналогичное (2.13), используется и для описания процесса изменения максимальной тепловой нагрузки котла  $Q_{k\max}(\tau)$ , определяемой увеличением температуры газов при выходе из топки в результате загрязнения поверхностей нагрева топки в эксплуатации.

3. Характеристики турбоагрегатов. Программа ОПТЭС/76 предусматривает: 1) расчет РХ турбоагрегатов; 2) корректирование РХ по отклонению локальных режимных параметров; 3) учет потерь от дросселирования пара в регулирующих клапанах турбины; 4) учет влияния случайных колебаний параметров пара на точки предоткрытия регулирующих клапанов турбины.

На основе диаграммы режима турбоагрегата вычисляется РХ турбоагрегата в следующем виде [8,9]:

$$Q_{\tau} (P_{\tau}, D_{\tau}^n, D_{\tau}^T) = Q_{\tau 0} + \kappa_{\tau}^n (D_{\tau}^n) \cdot D_{\tau}^n + \kappa_{\tau}^T D_{\tau}^T + q_{\tau}^T \cdot P_{\tau} - \sum_{k=0}^{n-1} (q_{\tau}^{k+1} - q_{\tau}^k) \cdot P_{\tau}^{\text{ЭК}}(D_{\tau}^n, D_{\tau}^T), \quad (3.1)$$

где  $Q_{\tau 0}$  - расход тепла на холостой ход при отсутствии нагрузки отборов;

$\kappa_{\tau}^n (D_{\tau}^n)$ ,  $\kappa_{\tau}^T D_{\tau}^n \cdot D_{\tau}^T$  - коэффициенты и нагрузки производственного и теплофикационного отборов;

$q_{\tau}^k = q_{\tau}^1, \dots, q_{\tau}^n$  - относительный прирост расхода тепла;

$P_{\tau}^{\text{ЭК}}(D_{\tau}^n, D_{\tau}^T)$  - мощности турбоагрегата, соответствующие точкам излома РХ (т.н. экономические мощности);

$$P_{\tau}^{\text{ЭК}}(D_{\tau}^n, D_{\tau}^T) = P_{\text{от}} - \alpha^k \cdot D_{\tau}^n - \beta^k \cdot D_{\tau}^T, \quad (3.2)$$

где  $P_{\text{от}}$  - неизменные для данного типа турбин мощности, соответствующие точкам излома расходных характеристик при  $D_{\tau}^n = 0$ ,  $D_{\tau}^T = 0$ ;

$\alpha^k, \beta^k$  - постоянные коэффициенты.

Минимальные и максимальные мощности турбоагрегатов

$$P_{\tau \text{min}} = P_{\tau \text{min}0} + \psi^n \cdot D_{\tau}^n + \psi^T \cdot D_{\tau}^T, \quad (3.3)$$

$$P_{\tau \text{max}} = P_{\tau \text{max}0} + \xi^n \cdot D_{\tau}^n + \xi^T \cdot D_{\tau}^T, \quad (3.4)$$

где  $P_{\tau \text{min}0}, P_{\tau \text{max}0}$  - минимальные и максимальные электрические мощности турбоагрегата при  $D_{\tau}^n = 0$ ,  $D_{\tau}^T = 0$ ;

$\psi^n, \psi^T, \xi^n, \xi^T$  - постоянные коэффициенты.

3.1. Корректирование РХ турбоагрегатов по отклонению параметров. Основными параметрами, оказывающими влияние на РХ, являются: давление в конденсаторе, давление и температура свежего пара, температура пара после промежуточного перегрева, температура питательной воды.

Давление в конденсаторе вычисляется по формуле [10]:

$$p_{\kappa} = 0,5 \cdot t_{\kappa}^2 - 6,1 \cdot t_{\kappa} + 152,8 \quad (3.5)$$

где  $t_k = f(W, D_2, t_{об}, F_k)$ .

Здесь  $W$  — расход охлаждающей воды;  
 $D_2$  — расход пара;  
 $t_{об}$  — температура охлаждающей воды;  
 $F_k$  — поверхность конденсатора на паровой стороне.

Влияние отклонения давления в конденсаторе учитывается формулой:

$$\Delta P_T = C \cdot \Delta p_k, \quad (3.6)$$

где  $\Delta p_k$  — отклонение давления в конденсаторе;  
 $C$  — постоянный коэффициент.

Давление в конденсаторе изменяется медленно, но значительно быстрее изменяются давление и температура пара. Отклонение температуры пара учитывается формулой [II]:

$$\frac{\Delta P_T}{P_H} = A \cdot \Delta t_{01} + B \cdot \Delta t_{02}, \quad (3.7)$$

где  $\Delta t_{01}, \Delta t_{02}$  — отклонения температуры свежего и перегретого пара от номинального значения.

Поправка на отклонение давления [II]

$$\frac{\Delta P_T}{P_H} = f(p_0, V_0, p_2, \Delta p_2), \quad (3.8)$$

где  $p_0$  — номинальное давление свежего пара;  
 $V_0$  — номинальный объем свежего пара;  
 $p_2$  — конечное давление пара;  
 $\Delta p_2$  — отклонение давления свежего пара.

3.2. Учет потерь, обусловленных дросселированием пара в регулирующих клапанах турбины. Обычно при распределении нагрузки РХ турбоагрегатов аппроксимируются линейными функциями с одним изломом в точке открытия перегрузочного клапана. При линеаризации характеристик турбоагрегатов пренебрегают потерями от дросселирования пара в регулирующих клапанах турбины. Если учитывать и указанные потери, то РХ турбоагрегатов становятся кусочно-вогнутыми функциями. Экономия в результате учета потерь от дросселирования пара для конденсационных турбин составляет 0,1...0,6% от расхода пара [12].

Программа ОПТЭС/76 учитывает эти потери методом ступенчатых ХОП [I2, I3]. При этом используются РХ, состоящие из отрезков, проведенных через точки предоткрытия клапанов.

3.3. Учет влияния случайных колебаний параметров пара на точки предоткрытия регулирующих клапанов турбины. Из-за колебания параметров пара точки предоткрытия клапанов также колеблются во времени. Чтобы избежать работу турбоагрегата в зоне с дросселированием пара, необходимо определить наименьшие возможные значения мощностей, соответствующие точкам предоткрытия, с учетом случайных колебаний параметров пара. Корректированные значения этих мощностей определяются по правилу трех сигм.

Значительное влияние на режим турбоагрегата оказывают также случайные колебания температуры охлаждающей воды. Однако, так как указанный параметр изменяется очень медленно во времени, его случайный характер может быть не учтен.

По результатам статистического анализа отклонений параметров пара установлено, что сдвиг точек излома, т.е. точек предоткрытия, РХ турбоагрегатов К-200-130 в сторону меньших мощностей, обусловленный случайными колебаниями температуры и давления свежего и промперегретого пара, составляет в среднем 1,5...3,5 % от максимальной мощности турбоагрегата.

В заключение следует подчеркнуть, что эффективность методики оценивания, т.е. расчета и корректировки, вход-выход характеристик агрегатов ТЭС, использованная в программе ОПТЭС/76, выявляется при практическом использовании этой программы в энергосистеме. Тогда оказывается возможным и оценка экономического эффекта от различных корректировок и дальнейшее усовершенствование методики.

#### Л и т е р а т у р а

И. Г р о д е ц к и й М.В. Вычисление энергетических характеристик агрегатов по априорной информации и эксплуатационным данным. - В кн.: Выбор наиболее выгоднейшего со-

става работающего оборудования в энергетических системах. Кишинев, АН МССР, 1970, с. 113...116.

2. Бененсон Е.И., Резникова Р.С., Бухман Г.Д. и др. Оценка степени неопределенности энергетических характеристик турбоагрегатов. - В кн.: Фактор неопределенности при принятии оптимальных решений в больших системах энергетики. Тезисы докладов симпозиума СЭИ СО АН СССР. Т.3, Иркутск, 1974, с. 163...166.

3. Каминская В.Я., Немура А.А. Некоторые методы идентификации нелинейных динамических объектов и их применение для определения расходных характеристик энергоагрегатов. - "Труды АН Лит. ССР. Сер Б", Т. 3 (66), 1971, с. 205...213.

4. Валдма М.Х., Вийлуп Л.К., Кээл М.Э., Мёллер К.Ю., Таммоя Х.Э.-Й. Программа оптимизации режима и расчета вход-выход характеристик тепловой электростанции с учетом случайных колебаний параметров режима. См. наст. сб., с. 11.

5. Таммоя Х.Э.-Й. Некоторые результаты статистического анализа параметров режима тепловых электростанций. См. наст. сб., с. 51.

6. Валдма М.Х. Об учете случайных факторов в характеристиках электростанций. - "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", 1969, серия А, № 275, с. 7...13.

7. Митропольский А.К. Интеграл вероятностей. ЛГУ, Л., 1972, 87 с.

8. Златопольский А.Н. Специальные диаграммы и характеристики турбин для расчетов наиболее выгодного распределения активной нагрузки в объединенной энергосистеме. - "Электрические станции", 1959, № 12, с. 36...40.

9. Фолькман К.Ю. Наиболее выгодное распределение электрической и тепловых нагрузок между турбогенераторами как основа автоматической оптимизации режима работы ТЭЦ. - В кн.: Автоматизация энергетики. Киев, 1964, с. 137...148.

10. Урин В.Д., Кутлер П.П. Энергетические характеристики для оптимизации режима электростанций и энергосистем. М., "Энергия", 1974, 135 с.

11. Щегляев А.В. Паровые турбины. М., "Энергия", 1964. 368 с.

12. Ringlee, R.J., Williams, D.D. Economic System Operation Considering Valve Throttling Losses. Part II Distribution of System load by the Method of Dynamic Programming. - "AIEE PAS", 1963, NO. 64, pp. 615...622.

13. Кутлер П.П., Лазебник А.И.  
Скляр В.Ф. Распределение нагрузок между турбоагрегатами ТЭС с учетом дросселирования пара в клапанах.- "Теплоэнергетика", 1972, № 6, с. 40...43.

M. Valdma, L. Viilup,  
K. Möller, H. Tammoja

About Estimation of Input-Output Characteristics  
of a Unit of Thermal Plants

S u m m a r y

The paper describes a method of estimation of input-output characteristics of boilers and turbines to correct their basic characteristics. It is possible to correct the characteristics by deviate parameters of boilers and turbines, by exploitation time of boilers, by fluctuation of parameters of steam, by probabilistic information of units and by valve throttling losses of turbines.



УДК 621.311.22.001

М.Х. Валдма, Х.Э.-Й. Таммоя

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК  
МЕЖДУ АГРЕГАТАМИ И РАСЧЕТА ВХОД-ВЫХОД  
ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Введение. Одной из важных подзадач в системе задач диспетчерского управления режимами электроэнергетической системы (ЭЭС) является задача оптимизации распределения нагрузок между параллельно работающими агрегатами внутри тепловой электростанции (ТЭС). С ней тесно связана другая важная задача – задача расчета вход-выход характеристик ТЭС для задач оптимизации режима на уровне ЭЭС. Теоретические основы указанных задач изложены в [1...3]. Вопросы методики оптимизации режима внутри ТЭС рассматриваются еще в ряде работ [4...10 и др.]. Для оптимизации распределения нагрузок между агрегатами разработано несколько типов аналоговых вычислительных машин [11, 12 и др.] и программ ЦВМ [13...15 и др.]. Из последних следует особенно отметить программу А-3<sup>1</sup> [14], которая позволяет комплексно определить распределение электрических и тепловых нагрузок внутри сложных тепловых электростанций (ТЭС) и вычислить их характеристики относительных приростов (ХОП) затрат.

Однако проблема еще далеко не разрешена. В настоящей статье предлагается один вариант методики оптимизации распределения нагрузок внутри ТЭС и расчета ее вход-выход характеристик. Особенностью излагаемой методики является: 1) учет случайных колебаний нагрузок котлоагрегатов; 2) учет потерь от дросселирования пара в регулирующих клапанах, турбин и случайных колебаний нагрузок турбоагрегатов;

<sup>1</sup> Программа А-3 разработана во ВНИИЭ и ВЦ ГТУ.

- 3) способ учета расхода электроэнергии на собственные нужды;
- 4) учет ограничений по пропускным способностям паропроводов;
- 5) учет случайных колебаний нагрузок ТЭС в ХОП затрат станции. Данная методика применяется в программе ОПТЭС/76 [16].

## 2. Учет случайных колебаний нагрузок котлоагрегатов.

Обычно в процессе изменения нагрузки котлоагрегатов заметную роль играет случайная составляющая. Среднеквадратические отклонения случайных колебаний нагрузок находятся в пределах 5...20 % [17], что оказывает влияние на определение оптимального распределения нагрузок между котлоагрегатами.

Рассмотрим фактическое значение нагрузки котлоагрегата ( $Q_k$ ) в любой момент времени в виде суммы:

$$Q_k = \bar{Q}_k + \Delta Q_k, \quad (2.1)$$

где  $\bar{Q}_k$  - плановая или оптимизируемая составляющая,  
 $\bar{Q}_k = M Q_k$ ;

где  $M$  - символ математического ожидания;

$\Delta Q_k$  - случайное отклонение нагрузки от планового значения.

Отклонения нагрузок разных котлов в общем случае взаимно коррелированы.

Для учета случайных отклонений нагрузок котлоагрегатов при оптимизации режима ТЭС может быть применен метод плановых характеристик [18, 19]: Согласно этому методу необходимо при оптимизации режима применять плановые ХОП затрат котлоагрегатов. Последние представляют собой зависимости производной математического ожидания затрат котлоагрегата от  $\bar{Q}_k$ . В данном случае плановые ХОП определяются с помощью следующего интегрального преобразования:

$$\bar{b}_k(\bar{Q}_k) = M \hat{b}_k(\bar{Q}_k + \Delta Q_k), \quad (2.2)$$

где  $\bar{b}_k(\bar{Q}_k)$  - плановая ХОП затрат;

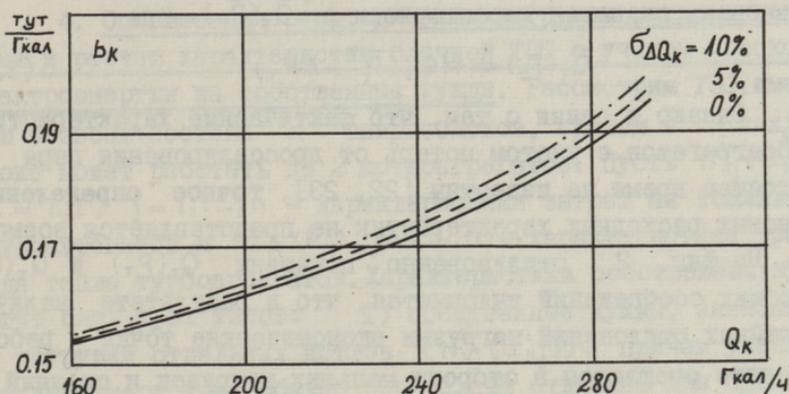
$\hat{b}_k(Q_k)$  - исходная ХОП затрат котлоагрегата.

Исходные ХОП затрат котлоагрегатов обычно целесообразно представить в виде полинома (до третьей степени). Тогда плановые ХОП затрат вычисляются по следующей формуле:

$$\bar{b}_k(\bar{Q}_k) = \hat{b}_k(\bar{Q}_k) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \hat{b}_k(\bar{Q}_k)}{\partial Q_k^2} \sigma_{\Delta Q_k}^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 \hat{b}_k(\bar{Q}_k)}{\partial Q_k^3} \sigma_{\Delta Q_k}^3, \quad (2.3)$$

где  $\sigma_{\Delta Q_k}$ ,  $\alpha_{\Delta Q_k}$  — среднеквадратическое отклонение и коэффициент асимметрии колебаний нагрузок.

Исходная и плановые ХОП затрат котлоагрегата показаны на фиг. 1.



Фиг. 1. Исходная и плановые ХОП котлоагрегата.

Совершенно аналогично учитываются случайные колебания нагрузок в характеристиках собственных нужд, если они являются дифференцируемыми функциями. Исходной вероятностной информацией об отклонениях нагрузок являются  $\sigma_{\Delta Q_k}$  и  $\alpha_{\Delta Q_k}$ .

3. Учет потерь дросселирования пара в регулирующих клапанах турбин и случайных отклонений нагрузок турбоагрегата. Учет потерь от дросселирования пара в регулирующих клапанах турбин дает экономию топлива 0,2...1,4% [6, 10]. Наиболее простым способом учета указанных потерь является представление расходных характеристик турбоагрегатов в виде кусочно-линейных функций с изломами в точках предоткрытия регулирующих клапанов (см. фиг. 2, кривая I) [1, 2].

Нагрузка турбоагрегата так же, как и другие параметры режима, имеет колебательный характер. Кратковременные флуктуации нагрузки имеют среднеквадратические отклонения 2...5%. Представим нагрузку турбоагрегата ( $P_T$ ) также в виде суммы двух слагаемых:

$$P_T = \bar{P}_T + \Delta P_T, \quad (3.1)$$

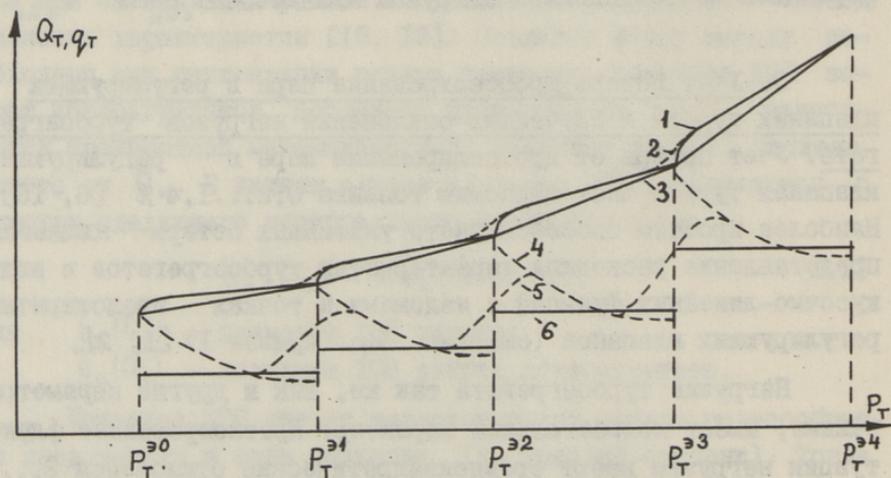
где  $\bar{P}_T$  - плановое или оптимизируемое значение нагрузки,  
 $\Delta P_T$  - случайное отклонение, неоптимизируемая составляющая нагрузки.

Пусть  $Q_T(P_T)$  - характеристика расхода тепла турбоагрегата. Из-за наличия случайных, неоптимизируемых отклонений нагрузки в оптимизационных расчетах должна быть использована плановая характеристика  $\bar{Q}_T(\bar{P}_T)$ , где

$$\bar{Q}_T(\bar{P}_T) = M Q_T(\bar{P}_T + \Delta P_T). \quad (3.2)$$

Однако в связи с тем, что фактические характеристики турбоагрегатов с учетом потерь от дросселирования пара в настоящее время не известны [22, 23], точное определение плановых расходных характеристик не представляется возможным. На фиг. 2 стилизованно показаны  $Q_T(P_T)$  и  $\bar{Q}_T(\bar{P}_T)$ . Из общих соображений выясняется, что в результате наличия случайных отклонений нагрузки экономические точки работы агрегата смещаются в сторону меньших нагрузок и средний расход тепла агрегата при работе экономической нагрузкой несколько увеличится.

Для учета случайных отклонений мощностей турбоагрегата в программе ОПТЭС/76 предусмотрен следующий приближенный способ. Корректируются только экономические значения мощности. Величина смещения точки ( $\Delta_i$ ) определяется по заданной вероятности ( $p$ ), с которой допускается крат-



Фиг. 2. Расходные характеристики (1...3) и ХОП (4...6) турбоагрегата: 1, 4 - фактические, 2, 5 - плановые, 3, 6 - модифицированные характеристики.

современная работа агрегата в начальных зонах открытия клапанов:

$$\Delta_i = \varepsilon_i(p), \quad (3.3)$$

где функции  $\varepsilon_i$  определены в предположении, что отклонения нагрузки имеют нормальный закон распределения.

4. Оптимизация распределения нагрузок между агрегатами и расчет характеристик блочной ТЭС с учетом расхода электроэнергии на собственные нужды. Рассмотрим ТЭС, имеющую в своем составе  $n$  энергоблоков, причем в каждом блоке может работать до 2 котлоагрегатов. Пусть  $B_{kj}^i(Q_{kj}^i)$ ,  $i = 1, 2$ ,  $j = 1, \dots, n$  — характеристики затрат на топливо котлоагрегатов и  $Q_{Tj}(P_{Tj})$ ,  $j = 1, \dots, n$  — характеристики расхода тепла турбоагрегатов. Характеристики собственных нужд могут быть трех типов: 1) собственные нужды, зависящие от нагрузки отдельных котлов ( $W_{kj}^i(Q_{kj}^i)$ ), причем указанные характеристики обычно определены отдельно для одиночной работы данного котла и для попарной работы двух котлов; 2) собственные нужды, зависящие от нагрузки энергоблока ( $W_{Tj}(P_{Tj})$ ); 3) общестанционные собственные нужды  $W_0$ , независящие от нагрузочного режима ТЭС.

Допустим, что в характеристиках агрегатов и собственных нужд уже учтены случайные колебания нагрузок. Для упрощения формул мы в дальнейшем не используем специальные обозначения для плановых характеристик.

Вводим следующие предположения: 1) характеристики затрат котлоагрегатов — строго выпуклые дифференцируемые функции; 2) характеристики расхода тепла турбоагрегатов — выпуклые кусочно-линейные функции; 3) характеристики собственных нужд котлоагрегатов — выпуклые дифференцируемые функции, а характеристики собственных нужд турбоагрегатов — линейные функции; 4) потери тепла в паропроводах включая расход пара на собственные нужды — линейные функции.

Характеристики котлоагрегатов обычно всегда соответствуют первому предположению. Второе предположение является общепринятым при математическом описании характеристик турбоагрегатов [3]. Остальные предположения введены для упрощения задачи. Как известно, характеристики питательных

насосов, дымососов и дутьевых вентиляторов имеют места разрыва непрерывности в моментах изменения состава или скоростного режима оборудования собственных нужд [22]. Однако строгий учет отмеченного обстоятельства возможен лишь при динамической постановке задачи с оптимизацией моментов переключения состава и режимов оборудования собственных нужд. Поэтому мы рассмотрим характеристики  $W_{kj}^i(Q_{kj}^i)$  упрощенно в виде выпуклых дифференцируемых функций.

Задача оптимизации распределения нагрузок внутри блочной ТЭС заключается в следующем: найти

$$\min_{Q_k, P_T} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 B_{kj}^i(Q_{kj}^i) \quad (4.1)$$

при ограничениях

$$Q_{Tj}(P_{Tj}) - \sum_{i=1}^2 Q_{kj}^i + Q_j^{\text{пот}}(Q_{Tj}(P_{Tj})) = 0, \quad j = 1, \dots, n; \quad (4.2)$$

$$P_{\text{от}} - \sum_{j=1}^n P_{Tj} + \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{i=1}^2 W_{kj}^i(Q_{kj}^i) + W_{Tj}(P_{Tj}) \right] + W_0 = 0; \quad (4.3)$$

$$Q_{kj}^i \in \Omega_{kj}^i, \quad i = 1, 2; \quad j = 1, \dots, n; \quad (4.4)$$

$$P_{Tj} \in \Omega_{Tj}, \quad j = 1, \dots, n. \quad (4.5)$$

Здесь  $Q_k, P_T$  - векторы:  $Q_k = \langle Q_{kj}^i, i = 1, 2; j = 1, \dots, n \rangle$ ,  
 $P_T = \langle P_{Tj}, j = 1, \dots, n \rangle$ ;  
 $Q_j^{\text{пот}}$  - потери тепла в паропроводах:  $Q_j^{\text{пот}} = \gamma_{0j} + \gamma_j Q_{Tj}(P_{Tj})$ ;

где  $\gamma_{0j}, \gamma_j$  - константы;

$P$  - заданная отпускаемая мощность ТЭС;

$\Omega_{kj}^i, \Omega_{Tj}$  - множества допустимых значений нагрузок агрегатов:

$$\Omega_{kj}^i = \{Q_{kj}^i: Q_{kj}^i \min \leq Q_{kj}^i \leq Q_{kj}^i \max\}, \quad \Omega_{Tj} = \{P_{Tj}: P_{Tj} \min \leq P_{Tj} \leq P_{Tj} \max\}.$$

Составим функцию Лагранжа:

$$\Phi(Q_k, P_T, \mu, \varepsilon) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 B_{kj}^i(Q_{kj}^i) + \sum_{j=1}^n \mu_j [Q_{Tj}(P_{Tj}) - \sum_{i=1}^2 Q_{kj}^i +$$

$$+ Q_j^{\text{пот}}(Q_{Tj}(P_{Tj})) + \varepsilon \left\{ P_{\text{ст}} - \sum_{j=1}^n P_{Tj} + \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{i=1}^2 W_{kj}^i(Q_{kj}^i) + W_{Tj}(P_{Tj}) \right] + W_0 \right\}, \quad (4.6)$$

где  $\mu$  - вектор множителей Лагранжа:  $\mu = \langle \mu_1, \dots, \mu_n \rangle$ ;  
 $\varepsilon$  - множитель Лагранжа.

На основе теории двойственности [24] можно исходную задачу (4.1)...(4.5) представить в следующей форме:

$$\min_{Q_k, P_T} \max_{\mu, \varepsilon} \Phi(Q_k, P_T, \mu, \varepsilon) \quad (4.7)$$

при  $Q_{kj}^i \in \Omega_{kj}^i$  и  $P_{Tj} \in \Omega_{Tj}$ ,  $i=1,2; j=1, \dots, n$ . (4.8)

Здесь  $\mu_j$  является относительным приростом суммарных затрат котлов блока, а  $\varepsilon$  - относительным приростом затрат станции. В оптимальном режиме  $\mu$  и  $\varepsilon$  имеют только положительные значения. Из этого следует, что  $\Phi$  имеет единственную седловую точку и что операторы  $\min$  и  $\max$  коммутируют [24]. Поэтому можно задачу (4.7)...(4.8) представить также в следующем виде:

$$\min_{P_T} \max_{\varepsilon} \left[ \min_{Q_k} \max_{\mu} \Phi(Q_k, P_T, \mu, \varepsilon) \right] \quad \text{при (4.8)} \quad (4.9)$$

Здесь на первом этапе решается задача

$$\min_{Q_k} \max_{\mu} \Phi(Q_k, P_T, \mu, \varepsilon) = \psi(P_T, \varepsilon) \quad \text{при (4.8)} \quad (4.10)$$

при заданных  $P_T$  и  $\varepsilon$ . На втором этапе:

$$\min_{P_T} \max_{\varepsilon} \psi(P_T, \varepsilon) \quad \text{при (4.8)} \quad (4.11)$$

Задача (4.10) представляет собой задачу оптимизации распределения нагрузок между котлоагрегатами при заданном векторе  $P_T$  и относительном приросте затрат станции. В развернутом виде она может быть записана так: для  $j=1, \dots, n$  найти

$$\min_{Q_{kj}^1, Q_{kj}^2} \sum_{i=1}^2 B_{kj}^i(Q_{kj}^i) + \varepsilon^0 \sum_{i=1}^2 W_{kj}^i(Q_{kj}^i) \quad (4.12)$$

при ограничениях (4.2) и (4.4). Здесь  $\varepsilon^0$  - значение относительного прироста ТЭС при оптимальном режиме.

Выписывая задачу (4.11) в развернутом виде, имеем:

$$\min_{P_T} \sum_{j=1}^n \mu_j [Q_{Tj}(P_{Tj}) + \varepsilon^0 W_{Tj}(P_{Tj}) + Q_j^{\text{пот}}(Q_{Tj}(P_{Tj}))] \quad (4.13)$$

при ограничениях (4.3) и (4.5). Это есть задача оптимизации распределения нагрузок между энергоблоками. Указанные задачи взаимосвязаны.

Задача оптимизации распределения нагрузок между котлоагрегатами решается методом относительных приростов [3]. При этом условием оптимальности является равенство

$$\frac{\partial B_{kj}^1}{\partial Q_{kj}^1} + \varepsilon^0 \frac{\partial W_{kj}^1}{\partial Q_{kj}^1} = \frac{\partial B_{kj}^2}{\partial Q_{kj}^2} + \varepsilon^0 \frac{\partial W_{kj}^2}{\partial Q_{kj}^2}. \quad (4.14)$$

Зависимость целевого функционала (4.13) от искомым является кусочно-линейной, причем зависимость  $Q_{Tj}(P_{Tj})$  выражается в виде [9]:

$$Q_{Tj}(P_{Tj}) = Q_{T0j} + q_{Tj}^r P_{Tj} - \sum_{k=0}^{r-1} (q_{Tj}^{k+1} - q_{Tj}^k) \cdot P_{Tj}^{\varepsilon k}, \quad (4.15)$$

где  $r$  определяется из условия

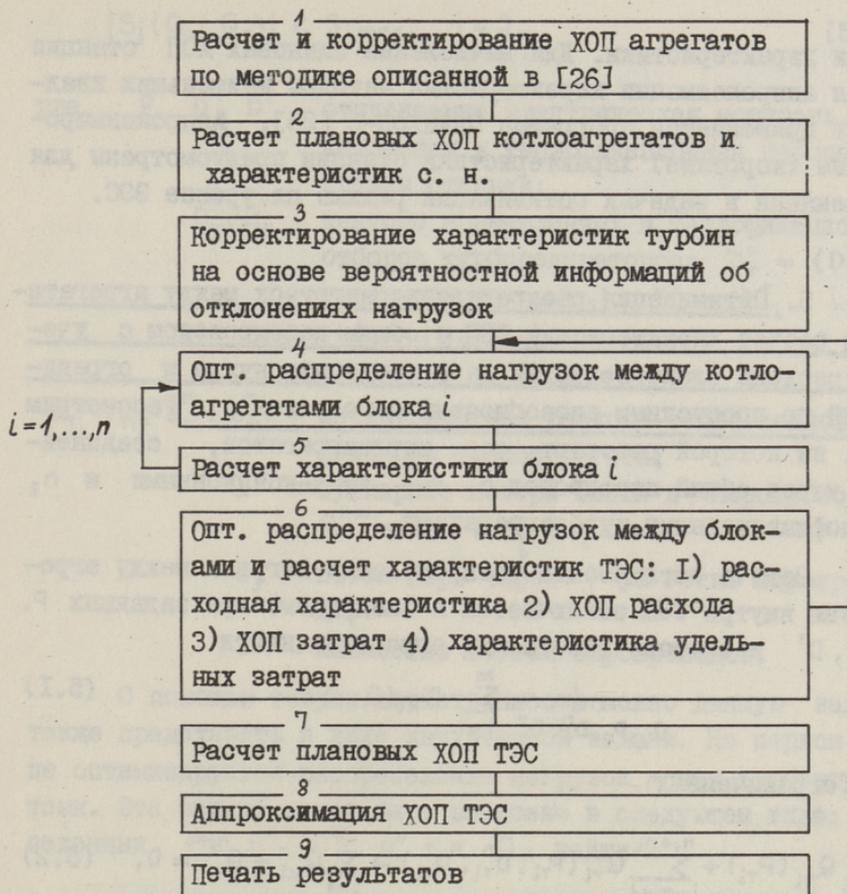
$$P_{Tj}^{\varepsilon r-1} < P_{Tj} \leq P_{Tj}^{\varepsilon r}. \quad (4.16)$$

Здесь  $Q_{T0j}$  — константа;  
 $q_{Tj}^r$  — относительный прирост расхода тепла в интервале (4.16);  
 $P_{Tj}^{\varepsilon k}$  — экономическая мощность (мощность точки излома характеристики).

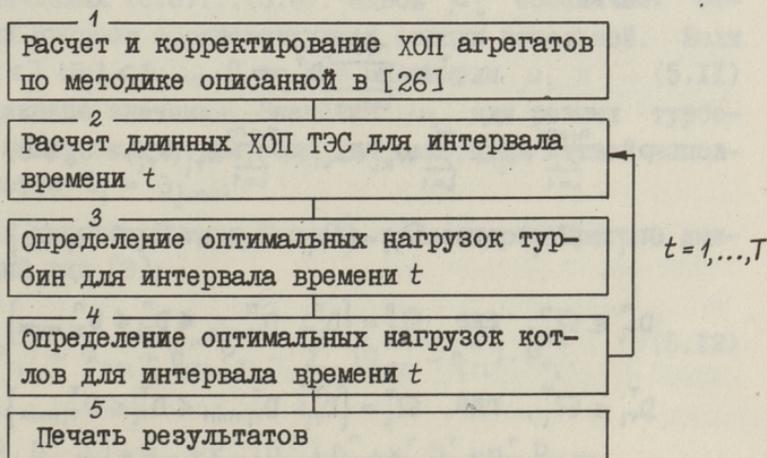
Для оптимального распределения нагрузок между блоками применяется принцип загрузки блоков в порядке возрастания их относительных приростов [3]. При этом обеспечивается, что при каждой  $P$  все блоки, за исключением одного, работают экономическими мощностями (в точках предоткрытия клапанов).

Блок-схемы расчета вход-выход характеристик блочной ТЭС и расчета оптимальных (суточных) графиков нагрузки агрегатов приведены на фиг. 3 и 4.

Сначала вычисляются т.н. длинные характеристики ТЭС. Они содержат все характерные точки режима. Например, длинная ХОП затрат блока содержит 8 точек, а длинная ХОП затрат станции при работе 10 блоков — 80 точек. Для учета случайных неоптимизируемых внутри ТЭС отклонений мощности станции вычисляется плановая ХОП ТЭС. Последним расчетным блоком алгоритма является блок кусочно-линейной аппрокси-



Фиг. 3. Блок-схема расчета вход-выход характеристик блочной ТЭС.



Фиг. 4. Блок-схема расчета оптимальных суточных графиков нагрузки агрегатов ТЭС.

магии характеристики. Для вычисления плановых ХОП станции и для аппроксимации характеристик методом наименьших квадратов применяется программа ПЛАНХОП-5 [25]. Аппроксимированные (короткие) характеристики станции предусмотрены для применения в задачах оптимизации режима на уровне ЭЭС.

5. Оптимизация распределения нагрузок между агрегатами и расчет характеристик ТЭЦ с общим паропроводом с учетом расхода электроэнергии на собственные нужды и ограничений по пропускным способностям паропроводов. Рассмотрим ТЭЦ, на которой работают  $m$  котлоагрегатов, соединенных через общий паропровод с  $n_1$  конденсационными и  $n_2$  теплофикационными турбоагрегатами.

Задача оптимизации распределения нагрузок между агрегатами внутри ТЭЦ заключается в следующем: при заданных  $P$ ,  $D^n$ ,  $D^T$  и составе работающих агрегатов найти

$$\min_{Q_{ki}, P_{Ti}, D_{Ti}^n, D_{Ti}^T} \sum_{i=1}^m B_{ki}(Q_{ki}) \quad (5.1)$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^{n_1} Q_{Ti}(P_{Ti}) + \sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} Q_{Ti}(P_{Ti}, D_{Ti}^n, D_{Ti}^T) - \sum_{i=1}^m Q_{ki} + Q^{\text{пот}} = 0, \quad (5.2)$$

$$D^n - \sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} D_{Ti}^n = 0, \quad (5.3)$$

$$D^T - \sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} D_{Ti}^T = 0, \quad (5.4)$$

$$P - \sum_{i=1}^{n_1+n_2} P_{Ti} + \sum_{i=1}^m W_{ki}(Q_{ki}) + \sum_{i=1}^{n_1+n_2} W_{Ti}(P_{Ti}) + W_0 = 0, \quad (5.5)$$

$$P_{Ti} \in \Omega_{Ti}, \quad \text{где } \Omega_{Ti} = \{P_{Ti}: P_{Ti, \min} \leq P_{Ti} \leq P_{Ti, \max}\}, \quad (5.6)$$

$$D_{Ti}^n \in \Omega_i^n, \quad \text{где } \Omega_i^n = \{D_{Ti}^n: D_{Ti, \min}^n \leq D_{Ti}^n \leq D_{Ti, \max}^n\}, \quad (5.7)$$

$$D_{Ti}^T \in \Omega_i^T, \quad \text{где } \Omega_i^T = \{D_{Ti}^T: D_{Ti, \min}^T \leq D_{Ti}^T \leq D_{Ti, \max}^T\}, \quad (5.8)$$

$$Q_{ki} \in \Omega_{ki}, \quad \text{где } \Omega_{ki} = \{Q_{ki}: Q_{ki, \min} \leq Q_{ki} \leq Q_{ki, \max}\}, \quad (5.9)$$

$$|S_j(Q_k, Q_T)| \leq S_{j \max}, \quad j \in J, \quad (5.10)$$

где  $P$ ,  $D^n$ ,  $D^T$  - отпускаемые электрическая мощность, промышленная и теплофикационная паровые нагрузки станции;

$D_T^n, D_T^T$  - векторы промышленных и теплофикационных отборов турбогенераторов:  $D_T^n = \langle D_{Ti}^n, i = n_1 + 1, \dots, n_1 + n_2 \rangle$ ,  $D_T^T = \langle D_{Ti}^T, i = n + 1, \dots, n_1 + n_2 \rangle$ ;

$Q_{Ti}(P_{Ti}, D_{Ti}^n, D_{Ti}^T)$  - характеристика расхода тепла теплофикационного турбоагрегата;

$Q^{\text{пот}}$  - суммарные потери тепла в паропроводах:  
 $Q^{\text{пот}} = \gamma_0 + \gamma_1 \sum_i Q_{Ti}$ ;

$S_j$  - поток пара через  $j$ -ую ветвь паропровода;

$J$  - множество ветвей паропроводов.

С помощью теории двойственности можно данную задачу также представить в виде двухэтапной задачи. На первом этапе оптимизируется распределение нагрузок между турбоагрегатами. Эта задача может быть записана в следующем виде: при заданных  $P$ ,  $D^n$ ,  $D^T$ ,  $\mu^0$  и  $Q_k$  найти

$$\min \left[ \sum_{i=1}^{n_1} \mu_i^0 Q_{Ti}(P_{Ti}) + \sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} \mu_i^0 Q_{Ti}(P_{Ti}, D_i^n, D_i^T) \right] \quad (5.11)$$

при ограничениях (5.3)...(5.8). Здесь  $\mu_i^0$  обозначает относительный прирост соответствующей секции котельной. Если для всех  $j \in J$   $|S_j| < S_{j \max}$ , то все множители  $\mu_i$  в (5.11) имеют одинаковые значения. Значения  $\mu_i$  для разных турбоагрегатов могут отличаться, если для некоторых ветвей выполнено равенство  $S_j = S_{j \max}$ .

Здесь характеристики расхода тепла турбоагрегата имеют следующий вид [9]:

$$Q_{Ti}(P_{Ti}) = Q_{T0i} + q_{Ti}^r P_{Ti} - \sum_{k=0}^{n-1} (q_{Ti}^{k+1} - q_{Ti}^k) \cdot P_{Ti}^{\text{ак}}, \quad (5.12)$$

$$Q_{Ti}(P_{Ti}, D_{Ti}^n, D_{Ti}^T) = Q_{T0i} + \kappa_{Ti}^n (D_{Ti}^n) \cdot D_{Ti}^n + \kappa_{Ti}^T D_{Ti}^T + q_{Ti}^r P_{Ti} -$$

$$-\sum_{k=0}^{n-1} (q_{\tau_i}^{k+1} - q_{\tau_i}^k) \cdot P_{\tau_i}^{ak}(D_{\tau_i}^n, D_{\tau_i}^T), \quad (5.13)$$

где  $k_n$  - квадратичная функция,  
 $k_T$  - константа.

Решение задачи (5.11) сводится к следующему: 1) оптимальное распределение заданной электрической нагрузки станции на основе принципа загрузки турбин в порядке возрастания  $\mu_i q_{\tau_i}$  при  $D_{\tau_i}^n = D_{\tau_i}^T = 0$ ; 2) загрузка теплофикационных турбоагрегатов тепловыми нагрузками по порядку возрастания их средних относительных приростов расхода тепла по  $D_{\tau_i}^n$  и  $D_{\tau_i}^T$ ; 3) корректирование распределения электрических нагрузок; 4) если после этого

$$\sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} D_{\tau_i}^n < D^n \quad (5.14)$$

или

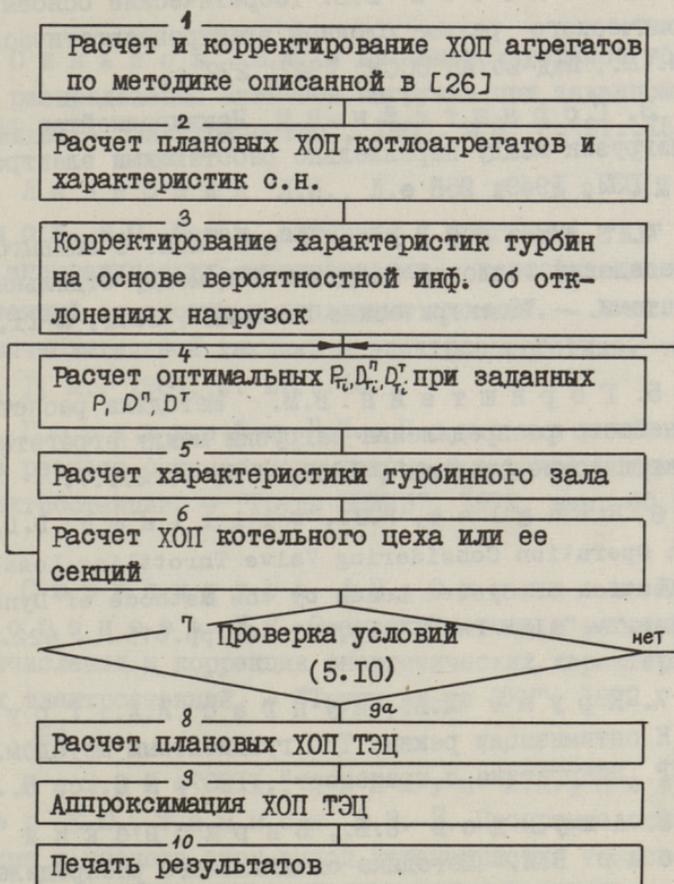
$$\sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} D_{\tau_i}^T < D^T, \quad (5.15)$$

то при возможности увеличивают электрические нагрузки теплофикационных турбин по порядку возрастания величин  $\mu_i q_{\tau_i}$  до тех пор пока условия (5.14) и (5.15) становятся равенствами. Если теплофикационные турбины не смогут покрывать всю тепловую нагрузку станции, то часть тепловых нагрузок покрывается через РОУ.

На втором этапе оптимизируется распределение нагрузок между котлоагрегатами. Задача заключается в следующем: при заданном векторе  $Q_T$  и  $\varepsilon^\circ$  найти

$$\min_{Q_k} \left[ \sum_{i=1}^m B_{ki}(Q_{ki}) + \sum_{i=1}^m \varepsilon^\circ W_{ki}(Q_{ki}) \right], \quad (5.16)$$

при ограничениях (5.2), (5.9) и (5.10). Задача решается методом относительных приростов. Если какой-либо поток в ветви  $j$  окажется вне предела, то этот поток фиксируется на пределе. В результате этого котельная разделяется на секции. Далее оптимизируется распределение нагрузок внутри каждой секции. При решении данной задачи учитываются также РОУ.



Фиг. 5. Блок-схема расчета вход-выход характеристик ТЭЦ.

Задачи (5.11) и (5.14) взаимосвязаны. Решение указанной двухэтапной задачи производится итеративным процессом. На фиг. 5. приведена блок-схема алгоритма расчета характеристик ТЭЦ. Алгоритм определения оптимальных (суточных) графиков нагрузки агрегатов ТЭЦ не отличается от соответствующего алгоритма для блочных ТЭС (см. фиг. 4).

#### Л и т е р а т у р а

I. S t e i n b e r g, M. J. Economic Loading of Power Plants and Electric Systems. "John Wiley and Sons", New-York, 1943, pp.203.

2. Болотов В.В. Теоретические основы выбора экономического режима сложной электроэнергетической системы. М., Изд-во АН СССР, 1947, 272 с.

3. Горнштейн В.М. Наиболее выгодное распределение нагрузок между параллельно работающими электростанциями. М.-Л., ГЭИ, 1949, 256 с.

4. Златопольский А.Н. О наиболее выгодном распределении тепловой нагрузки ТЭЦ между отдельными турбоагрегатами. - "Электрические станции", 1961, № II, с. 23... 28.

5. Горнштейн В.М. Методика расчета наиболее выгодного распределения нагрузки между агрегатами ТЭЦ. - "Электрические станции", 1962, № 8, с. 2...7.

6. Ringl e e, R.J., W i l l i a m s, D.D. Economic System Operation Considering Valve Throttling Losses. Part2. Distribution of System Loads by the Methode of Dynamic Programming. - "AIEE PAS", 1963, NO 64, pp.615 ... 622.

7. Крумм Л.А., Пунгас А.А., Грущева А.А. К оптимизации режима ТЭС градиентным методом. - "Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт", 1967, № 6, с. 9...20.

8. Ахундов Э.Б., Вирковский Н.П., Шербиг В.И. Методика оптимального распределения нагрузок на ТЭЦ. - "Теплоэнергетика", 1968, № 10, с. 34...37.

9. Фолькман К.Ф. Наиболее выгодное распределение электрических и тепловых нагрузок между турбоагрегатами как основа автоматизированной оптимизации режима работы ТЭЦ. - В кн.: Автоматизация энергетики. Киев, Ин-т техн. информации, 1969, с. 137...148.

10. Рузанков В.Н. Методика распределения тепловых и электрических нагрузок между турбинами мощных отопительных ТЭЦ. - "Теплоэнергетика", 1973, № 6, с. 80...82.

11. Ахундов Э.Б. Каханович В.С. К вопросу непосредственного замера относительного прироста энергоустановок. - "Труды ин-та энергетики АН БССР", 1959, вып. 10, с. 81...97.

12. С и н ь к о в В.М. и др. Вычислительное устройство для распределения активной нагрузки при заданном расходе топлива. - "Электричество", 1960, № 8, с. 9...15.

13. Л а з е б н и к Л.И., Л е б е д е в а О.И., Ш а х а н о в В.С. Метод, алгоритм и программа "К1" вычисления энергетических характеристик теплофикационных электростанций со сложными тепловыми схемами. - В кн.: Применение вычислительной техники в электроэнергетике. Матер. конф. Сб. I, М., 1964, с. 27...40.

14. Г о р н ш т е й н В.М., П о н о м а р е в А.В. Методика расчета оптимального режима и характеристик тепловой электростанции. - "Труды ВНИИЭ", 1972, вып. 40, с.31...51.

15. С к р и п н и к о в А.В., С и з и к о в Н.В., А ф и н о г е н о в а Л.Н. Элементы метода и алгоритма "К3", вычисления и коррекции энергетических характеристик тепловых электростанций. - "Труды ич-та ЭУМ", 1972, вып. 9, с. 60...64.

16. В а л д м а М.Х., В и й л у п Л.К., К э э л М.Э., М ё л л е р К.Ю., Т а м м о я Х.Э.-И. Программа оптимизации режима и расчета вход-выход характеристик тепловой электростанции с учетом случайных колебаний параметров режима. См. наст. сб., с. II.

17. Т а м м о я Х.Э.-И. Некоторые результаты статистического анализа параметров режима тепловых электростанций. См. наст. сб., с. 5I.

18. В а л д м а М.Х. Учет случайного характера режима при оптимальном планировании распределения активных нагрузок в энергетической системе. - "Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт", 1969, № 6, с. 36...43.

19. В а л д м а М.Х. Об учете случайных факторов в характеристиках электростанции. - "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", 1969, серия А, № 275, с. 7...13.

20. D e s k e r, G.L., B r o o k s, A.D. Valve Point Loading of Turbines. - "AIEE PAS", 1958, NO 37, pp.481...484.

21. К у т л е р П.П., Л а з е б н и к Л.И., С к л я р о в В.Ф. Распределение нагрузок между турбоагрегатами

ТЭС с учетом дросселирования пара в клапанах. - "Теплоэнергетика", 1972, № 6, с. 40...43.

22. У р и н В.Д., К у т л е р П.П. Энергетические характеристики для оптимизации режима электростанций и энергосистем. М., "Энергия", 1974, 135 с.

23. С и н ь к о в В.М. и др. Оптимизация режимов энергетических систем. Киев, "Вища школа", 1973, 277 с.

24. Г о л ь ш т е й н Е.Г. Теория двойственности в математическом программировании и ее приложения. М., "Наука", 1971. 352 с.

25. Л е л у м е э с Х.Э. Программа расчета планов характеристик энергообъектов в вероятностно-определенных условиях. См. наст. сб., с. 47.

26. В а л д м а М.Х., В и й л у п Л.К., М ё л л е р К.Ю., Т а м м о я Х.Э.-Й. Об оценивании вход-выход характеристик агрегатов тепловых электростанций. См. наст. сб., с. 17.

M. Valdma, H. Tammoja

A Method of Optimal Load Planning between Units  
and Calculation of Input-Output Characteristics  
of a Thermal Plant

S u m m a r y

The paper describes a method of optimal load dispatching between units and calculation of input-output characteristics of a thermal plant. The method allows to take into account several factors: 1) limited capacity of steam tie line, 2) random loads fluctuations of boilers, turbines and the station, 3) valve throttling losses of turbines.

The computer program is also developed.

УДК 621.311.1

Х.Э. Лелумез

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПЛАНОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЭНЕРГООБЪЕКТОВ В ВЕРОЯТНОСТНО-ОПРЕДЕЛЕННЫХ  
УСЛОВИЯХ

Описываемая программа расчета плановых характеристик (ПЛАНХОП-5) является одной из серии (под названием ПЛАНХОП) [2], разработанной в Таллинском политехническом институте. Она предназначена для расчета плановых расходных характеристик и плановых характеристик относительных приростов (ХОП) энергообъектов [2]. Также производится кусочно-линейная аппроксимация плановой ХОП.

В отличие от ранее составленных программ ПЛАНХОП-5 позволяет вычислить плановые характеристики при разных формах исходных данных.

Исходная информация об отклонениях нагрузок может быть задана либо в виде гистограммы, либо с помощью числовых характеристик (дисперсия, асимметрия, эксцесс). Отклонения нагрузок могут быть функциями плановой мощности, причем в качестве закона распределения отклонений мощностей принято распределение Грама-Шарле.

Плотность распределения отклонений мощностей сильно зависит от плановой мощности в окрестностях минимальной и максимальной допустимых значений мощностей объекта энергосистемы (эффект усечения закона распределения). Вид усечения зависит от характера объекта. В связи с этим программа позволяет применять один из двух способов усечения, по которым выражения плотности распределения следующие:

$$f(P) = \frac{g(Z) \cdot \bar{T}(Z - P^-) \cdot \bar{T}(P^+ - Z)}{\int_{P^-}^{P^+} g(Z) dZ}, \quad (I)$$

$$f(P) = \int_{-\infty}^{P^-} g(Z) dZ \cdot \delta(P^- - Z) + g(Z) \cdot \bar{1}(Z - P^-) \cdot \bar{1}(P^+ - Z) + \int_{P^+}^{\infty} g(Z) dZ \cdot \delta(Z - P^+); \quad (2)$$

где  $g(Z)$  - плотность распределения переменной  $Z$ ;  
 $Z$  - вспомогательная случайная переменная, плотность распределения которой равна неусеченной плотности распределения мощности;  
 $P^-$  и  $P^+$  - минимальное и максимальное допустимые значения мощности объекта;  
 $\bar{1}(\cdot)$  - единичная функция;  
 $\delta(\cdot)$  - дельта-функция.

Координаты точек (всего 20) плановых характеристик вычисляются относительно математического ожидания переменной  $Z$ :

$$ZP = M[Z],$$

где  $M$  - символ математического ожидания.

В случае, когда закон распределения отклонений не зависит от плановой мощности, координаты точек плановых характеристик определяются по следующим формулам:

I) Усечение исходной плотности производится по выражению (I):

$$\bar{T}(ZP_j) = \frac{\int_{P^-}^{P^+} T(Z) \cdot g(Z, ZP_j) dZ}{\int_{P^-}^{P^+} g(Z, ZP_j) dZ}, \quad (3)$$

$$\bar{B}(ZP_j) = \frac{\int_{P^-}^{P^+} B(Z) \cdot g(Z, ZP_j) dZ - g(P^+) \cdot [T(P^+) - \bar{T}(ZP_j)] + g(P^-) \cdot [T(P^-) - \bar{T}(ZP_j)]}{\int_{P^-}^{P^+} g(Z, ZP_j) dZ - g(P^+) \cdot [P^+ - \bar{P}(ZP_j)] + g(P^-) \cdot [P^- - \bar{P}(ZP_j)]}, \quad (4)$$

$$\bar{P}(ZP_j) = \frac{\int_{P^-}^{P^+} Z \cdot g(Z, ZP_j) dZ}{\int_{P^-}^{P^+} g(Z, ZP_j) dZ}, \quad (5)$$

где  $\bar{T}(ZP_j)$ ,  $\bar{B}(ZP_j)$ ,  $\bar{P}(ZP_j)$  - плановый расход, плановый относительный прирост и плановая мощность при  $ZP_j$ ;

$g(P^+)$  и  $g(P^-)$  - значения плотности распределения  $g(Z)$  при  $P^+$  и  $P^-$ ;

$j$  - индекс точки;

$T(Z)$ ,  $B(Z)$  - исходные расходная характеристика и ХОП.

2) Усечение исходной плотности оогласно формуле (2):

$$\bar{T}(Z P_j) = T(P^-) \cdot \int_{-\infty}^{P^-} g(Z, Z P_j) dZ + \int_{P^-}^{P^+} T(Z) \cdot g(Z, Z P_j) dZ + T(P^+) \cdot \int_{P^+}^{\infty} g(Z, Z P_j) dZ, \quad (6)$$

$$\bar{B}(Z P_j) = \frac{\int_{P^-}^{P^+} B(Z) \cdot g(Z, Z P_j) dZ}{\int_{P^-}^{P^+} g(Z, Z P_j) dZ}, \quad (7)$$

$$\bar{P}(Z P_j) = P^- \cdot \int_{-\infty}^{P^-} g(Z, Z P_j) dZ + \int_{P^-}^{P^+} Z \cdot g(Z, Z P_j) dZ + P^+ \cdot \int_{P^+}^{\infty} g(Z, Z P_j) dZ. \quad (8)$$

3) В случае зависимости закона распределения от плановой мощности точки плановых характеристик вычисляются методом численного дифференцирования по следующим формулам:

$$\bar{T}(Z P_j) = [\bar{T}(Z P_j + D) + \bar{T}(Z P_j - D)] / 2, \quad (9)$$

$$\bar{B}(Z P_j) = \frac{\bar{T}(Z P_j + D) - \bar{T}(Z P_j - D)}{\bar{P}(Z P_j + D) - \bar{P}(Z P_j - D)}, \quad (10)$$

$$\bar{P}(Z P_j) = [\bar{P}(Z P_j + D) + \bar{P}(Z P_j - D)] / 2, \quad (11)$$

где  $D$  - шаг дифференцирования.

Все величины в правых частях выражений (9), (10) и (11) вычисляются в зависимости от выбранного способа усечения, т.е. либо по формулам (3), (4), (5), либо по (6), (7) и (8).

Аппроксимации плановых ХОП производятся методом наименьших квадратов [1].

Программа составлена на языке ФОРТРАН для ЦВМ М-222 (входной язык транслятора Ф-20). Программа ПЛАНХОП-5 занимает около 3000 ячеек оперативной памяти ЦВМ. Среднее время расчета плановой ХОП с аппроксимацией на ЦВМ М-222 около 3 минут.

## Л и т е р а т у р а

1. В а л д м а М.Х., Л е л у м е е с Х.Э. Расчет и аппроксимация плановых характеристик элементов энергосистем в вероятностно-определенных условиях. - "Тр. Таллинск. политехн. ин.-та", 1974, № 364, с.19...25.

2. В а л д м а М.Х. Учет случайного характера режима при оптимальном планировании распределения активных нагрузок в энергетической системе. - "Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт", 1969, № 6, с. 36...43.

H. Lelumees

A Program for Calculation of Planning  
Characteristics of Power System Elements  
under Risk-Taking Situation

### S u m m a r y

The algorithm of the calculation of the planning characteristics is presented here. The program named PLANHOP-5 is written in FORTRAN for the computer M-222.

УДК 621.311.22.001

Х.Э.-Й. Таммоя

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

1. Введение. На режим тепловых электростанций (ТЭС) влияют различные эксплуатационные параметры ее агрегатов. Режим работы котлоагрегатов характеризуется следующими основными параметрами: температура и давление первичного и вторичного пара, температура уходящих газов, температура питательной воды, нагрузки котлоагрегата и другие. Режим турбоагрегата определяется следующими параметрами: температура и давление свежего пара, давление пара в регулирующих отборах, температура и расход охлаждающей воды, электрические и тепловые нагрузки турбоагрегата [1,2]. В результате воздействия различных случайных факторов эти параметры имеют также случайный характер. Для исследований случайных колебаний параметров необходимо произвести статистический анализ параметров режима ТЭС. Результаты анализа позволяют:

- 1) анализировать качество регулирования,
- 2) выяснить наличие несогласованности действий в системе управления ТЭС,
- 3) выяснить наличие систематических погрешностей в исходных данных,
- 4) получить статистическую информацию о случайных колебаниях параметров режима.

Результаты предварительного анализа случайных колебаний режимных параметров агрегатов ТЭС показали, что подходящим периодом анализа является один месяц. Статистический анализ выполнен на ЭЦВМ типа М-222 и "Минск-22" по программам, разработанным в Таллинском политехническом институте.

**2. Методика исследования.** Исходными данными являлись эксплуатационные замеры параметров режима ТЭС. Для анализа случайные непрерывные процессы рассматривались как случайные процессы с дискретным временем  $\xi(t)$ , где  $\xi$  исследуемый параметр. Случайные колебания нагрузок агрегатов являются функциями от плановой нагрузки ТЭС. Для анализа нагрузок котлоагрегатов были определены совокупности исходных данных  $\xi_i (i \in I)$ , где  $I$  - множество нагрузок котлоагрегатов, при которых нагрузки ТЭС постоянная. Исходными данными для анализа отклонений нагрузок ТЭС являлись фактические и планированные графики нагрузок ТЭС за определенный период времени  $T_0$ . Отклонения нагрузки  $\xi_i$  выражаются в виде:

$$\xi_{ik} = x_{ik} - \bar{x}_{ik}, \quad k=1, \dots, T_0, \quad i \in M,$$

где  $x_{ik}$ ,  $\bar{x}_{ik}$  - фактическая и плановая почасовые нагрузки  $i$ -ой ТЭС в течение  $T_0$  часов;  
 $M$  - множество исследуемых ТЭС.

Статистические характеристики колебания параметров не имеют монотонных трендов. Поэтому оправдано применение математического аппарата анализа стационарных процессов. Нестационарные колебания параметров, являющиеся функциями от нагрузки агрегата, подвергались предварительной стационаризации.

Статистический анализ параметров выполнен в следующем объеме: а) вычислены оценки и доверительные интервалы математических ожиданий  $m_\xi$  и среднеквадратичных отклонений  $\sigma_\xi$ ; б) вычислены оценки коэффициента асимметрии  $a_\xi$  и эксцесса  $ex_\xi$  отклонений параметра режима исследуемых агрегатов; в) вычислены гистограммы распределения вероятностей и выполнена проверка гипотезы о нормальности закона распределения отклонений по критерию  $\chi^2$ ; г) вычислены функции автокорреляции  $\rho_\xi(\tau)$  и их доверительные интервалы; д) вычислены функции спектральной плотности  $g_\xi(f)$ ; е) определены зависимости оценок трех числовых характеристик  $\sigma_\xi$ ,  $a_\xi$ ,  $ex_\xi$  отклонений нагрузки от планового значения нагрузки ТЭС. Выполнена проверка стационарности и случайности процессов колебания параметров по сериальным критериям [3]. Анализу подвергались колебания режимных па-

раметров 7 турбоагрегатов четырех ТЭС: из них две мощные конденсационные ТЭС (КЭС) мощностью по 1600 МВт и две маломощные ТЭС мощностью ниже 100 МВт. Основные результаты статистического анализа приведены в таблице I.

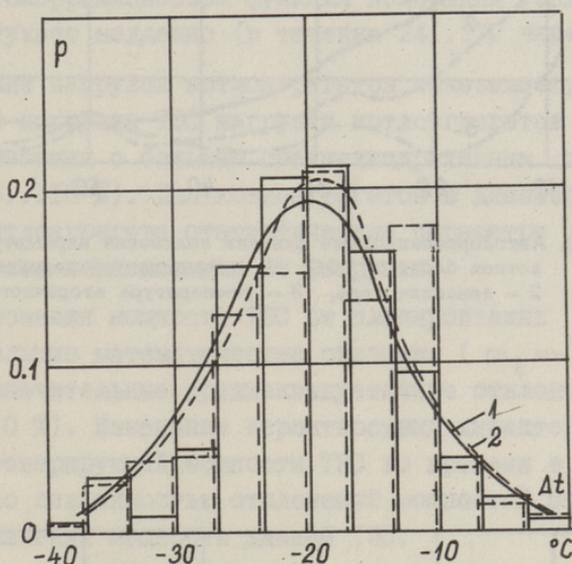
3. Результаты анализа. Любое изменение режима работы котлоагрегата приводит к отклонению температуры перегретого пара от номинального значения. Математическое ожидание температуры первичного пара для всех проанализированных агрегатов мощных ТЭС ниже номинального ( $m_{\xi} = -3,0 \dots -2,0 \%$ ), и только для ТЭС малой мощности математические ожидания имеют небольшие положительные значения ( $m_{\xi} = 1,1 \dots 2,0 \%$ ). Интересно отметить, что математическое ожидание колебаний температуры вторичного пара меньше, чем первичного пара и составляет  $-1,1 \dots -1,2 \%$ . Среднеквадратичное отклонение не зависит от типа агрегата и является довольно стабильным ( $\sigma_{\xi} = 0,5 \dots 2,2 \%$ ). Математическое ожидание отклонений давления пара незначительное ( $m_{\xi} = -1,2 \dots 1,0 \%$ ), в то же время максимальные отклонения от номинального значения могут доходить до  $10 \dots 20 \%$ , что вызывает колебания мощности турбоагрегата в пределах  $0,3 \dots 3 \%$ . Температура питательной воды имеет значительные отклонения от номинального значения ( $\xi_{t_{nb}} = 10 \dots 30 \%$ ). Их математическое ожидание для блочных ТЭС небольшое ( $m_{\xi} = -0,8 \dots -1,1 \%$ ), а для котлов в общем паропроводе на порядок больше ( $m_{\xi} = -10,0 \dots -14,5 \%$ ). В колебаниях температуры питательной воды имеется явно выраженный периодический компонент, который обусловлен регулярным изменением нагрузки энергоблока в течение суток.

Основные ТЭС Эстонской энергосистемы сжигают горючие сланцы, что обуславливает износ и загрязнение поверхностей нагрева котлов в значительно большей степени, чем при использовании других твердых топлив. Это существенно усугубляет случайность температуры уходящих газов. В процессе эксплуатации колебания температуры уходящих газов имеют тенденцию к возрастанию [4], в достаточно коротком периоде эти колебания можно принимать стационарными. Колебания температуры уходящих газов имеют значительные среднеквадратичные отклонения ( $\sigma_{\xi} = 4,0 \dots 11 \%$ ).

## Результаты статистического анализа колебаний параметров режима ТЭС

Параметр режима	Тип ТЭС	Математическое ожидание, %	Среднеквадратичное отклонение, %	Коэффициент асимметрии	Экссесс
1. Температура первичного пара	КЭС	-3,0...-2,0	0,5...2,0	-0,7...1,0	-0,2...3,7
	ТЭС	1,0... 2,0	1,5...2,0	-0,5...0,1	-2,0...4,0
2. Температура вторичного пара	КЭС	-1,2...-1,1	1,6...2,2	0,2...0,5	-0,2...0,5
	КЭС	-1,2...1,0	1,4...3,5	-0,5...2,0	0,1...3,0
3. Давление первичного пара	ТЭС	-0,5...0,7	1,5...2,5	-1,5...0,5	1,0...2,0
	КЭС	-0,8...-14,5	3,5...11,5	-1,5...-0,1	-1,5...2,0
4. Температура питательной воды	ТЭС	-10,0...-11,5	5,0...5,5	0,2...1,0	-1,0...1,0
	КЭС	-13,0...24,0	5,4...11,0	-1,0...2,0	-1,0...3,0
5. Температура уходящих газов	ТЭС	-25,0...18,0	4,0...6,0	-3,0...1,5	1,5...2,5
	КЭС	-21 ... -8	5,3...18,0	-2,0...1,5	-1,0...5,2
6. Нагрузка котлоагрегатов	ТЭС	-40 ...-10	2,5...12,0	-1,0...1,5	-1,0...0,5
	КЭС	...	...	...	...
7. Нагрузка отборов турбин:	а) промышленного	-70...-80	11,0...15,0	-1,5...2,0	0,4...3,0
	б) отопительного	-35...-75	6,2...7,5	0,1...3,0	0,8...2,0
8. Отклонения нагрузки ТЭС	КЭС	-1,5...2,0	5,0...8,0	1,0...3,5	-1,0...1,5
	ТЭС	-2,5...1,5	4,5...5,0	-0,1...0,5	0,1...0,5

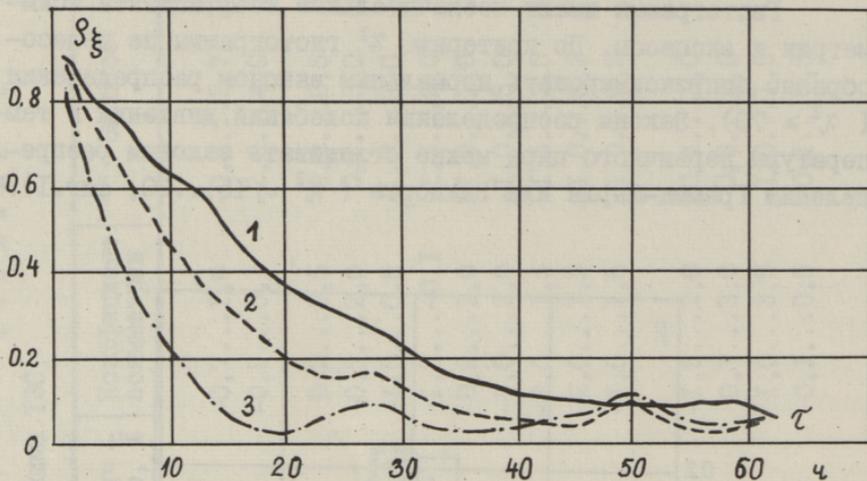
Гистограммы имеют незначительные коэффициенты асимметрии и эксцессы. По критерию  $\chi^2$  гистограммы не целесообразно аппроксимировать нормальным законом распределения ( $\chi^2 \geq 70$ ). Законы распределения колебаний давления и температуры первичного пара можно сглаживать законом распределения Грамма-Шарле или Эджворта ( $\chi^2 = 15 \dots 20$ , фиг.1).



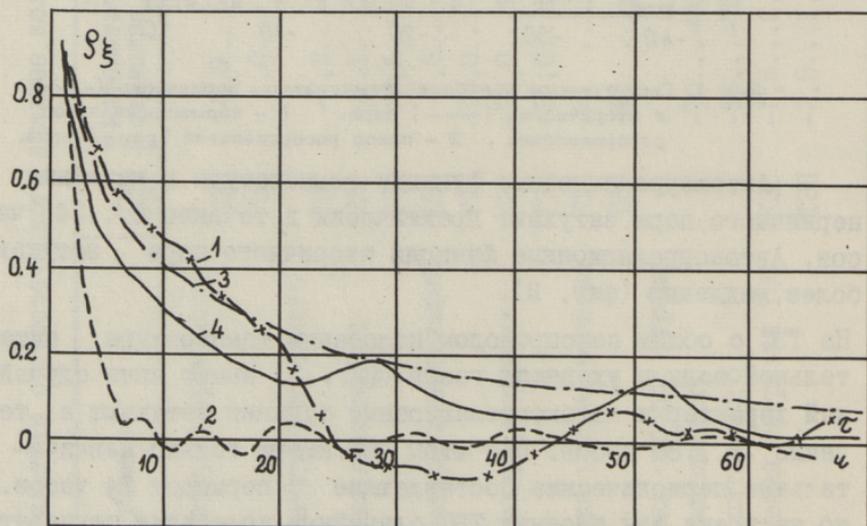
Фиг. 1. Гистограммы колебаний температуры первичного (----) и вторичного (—) пара: 1 - нормальный закон распределения, 2 - закон распределения Грама-Шарле.

Автокорреляционные функции температуры и давления первичного пара затухают практически в течение 2...24 часов. Автокорреляционные функции вторичного пара затухают более медленно (фиг. 2).

На ТЭС с общим паропроводом колебания температуры питательной воды и уходящих газов (фиг. 3) имеют явно случайный характер и автокорреляционные функции затухают в течение 72...80 часов. При этом они имеют только незначительные периодические составляющие с периодом 24 часов. В то же время для блочных ТЭС случайные колебания температуры питательной воды незначительные, их спектральные плотности можно разбить на две составляющие: периодический компонент (с периодом 24 часов) и широкополосный случайный шум с незначительной амплитудой.



Фиг. 2. Автокорреляционные функции колебаний параметров пара котлов блочных ТЭС: 1 - температура первичного пара, 2 - давление пара, 3 - температура вторичного пара.



Фиг. 3. Автокорреляционные функции колебаний параметров ТЭС: 1 - температура питательной воды, 2 - давление пара, 3 - температура уходящих газов, 4 - температура питательной воды блочной ТЭС.

На режим турбоагрегатов существенно влияют случайные колебания тепловых нагрузок. Среднеквадратичное отклонение колебаний для отопительных отборов имеют значения 6...7 % от максимального значения, а для промышленных отборов II ...15 %. При этом среднеквадратичное отклонение нагрузок промышленных отборов зависит от типа промышленного потребителя. Автокорреляционная функция колебаний тепловых нагрузок затухает медленно (в течение 24...72 часов).

Анализ нагрузок котлоагрегатов показывает, что при постоянной нагрузке ТЭС нагрузки котлоагрегатов имеют случайные колебания с большим среднеквадратичным отклонением ( $\sigma_{\xi} = 2,5...18 \%$ ). Для котлоагрегатов в диапазоне регулирования котлоагрегата статистические параметры  $\sigma_{\xi}$ ,  $\mu_{\xi}$ ,  $\nu_{\xi}$  можно считать независимыми от нагрузки.

Отклонения мощности ТЭС от планированных значений имеют небольшие математические ожидания ( $\mu_{\xi} = -1,5...2,0 \%$ ) и весьма значительные среднеквадратичные отклонения ( $\sigma_{\xi} = 4,5...8,0 \%$ ). Изменение вероятностных характеристик отклонений генерирующей мощности ТЭС во времени в основном обусловлено зависимостью отклонений мощностей от планированного значения мощности данной ТЭС.

4. Выводы. 1) Случайные факторы имеют большое значение в формировании фактических режимов ТЭС и поэтому учет случайных факторов при оптимизации внутростационарных режимов ТЭС является целесообразным.

2) Колебания режимных параметров (температура и давление перегретого пара, температура питательной воды) котлоагрегатов можно считать стационарными.

3) Статистические параметры отклонений нагрузок ТЭС зависят от плановой нагрузки. Эти зависимости являются устойчивыми и позволяют свести нестационарный процесс отклонений на стационарный.

4) Для уточнения статистических характеристик и исследования их устойчивости во времени целесообразно продолжать анализ параметров режима ТЭС.

## Л и т е р а т у р а

1. Горнштейн В.М. Наивыгоднейшее распределение нагрузок между параллельно работающими электростанциями. М.-Л., ГЭИ, 1949. 256 с.

2. Steinberg, M.J., Smith T.H. Economic Loading of Power Plants and Electric Systems. "John Wiley and Sons", New-York, 1943, pp. 203.

3. Бендрат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М., "Мир", 1974. 464 с.

4. Сташкив М.Л., Гудкин М.В., Комп Э.Т. Влияние загрязненности поверхностей нагрева на паропроизводительность и экономичность сланцевого котла. - "Теплоэнергетика", 1972, № 12. с. 37...39.

H. Tammoja

### Some Results of Statistical Analysis of State Parameters of Thermal Plants

#### S u m m a r y

The results of the statistical analyses of state parameters of boilers and turbines are shown in the paper. Dispersion, correlation, asymmetry and other statistical parameters are also calculated.

УДК 621.311.153

М.В. Мельдорф

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРУЗКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Определение нагрузки энергетической системы с точностью, необходимой для решения задач планирования режима системы, предполагает тщательное изучение графиков нагрузки на основе их математического описания. Ниже рассматривается путь создания математической модели нагрузки на основе развития и уточнения идей, приведенных в [1 и 2].

Представим нагрузку в виде нестационарного случайного процесса, основными тенденциями изменения которого являются общий рост (тренд) нагрузки, а также сезонные, недельные и суточные изменения нагрузки. Дополнительно могут рассматриваться месячные изменения нагрузки, зависимость нагрузки от метеорологических факторов, уровня напряжения и частоты. К учету подлежат также особенности графиков нагрузки особых дней (государственные праздники, пред- и послепраздничные дни, рабочие субботы и т.п.).

Выделим сперва тренд нагрузки, представляя нагрузку в виде

$$P(t) = E(t) p(t), \quad (1)$$

где  $E(t)$  - функция, аппроксимирующая тренд;  
 $p(t)$  - приведенная нагрузка.

Тренд может быть выражен в виде

$$E(t) = P_0 e^{\alpha(t-t_0)}, \quad (2)$$

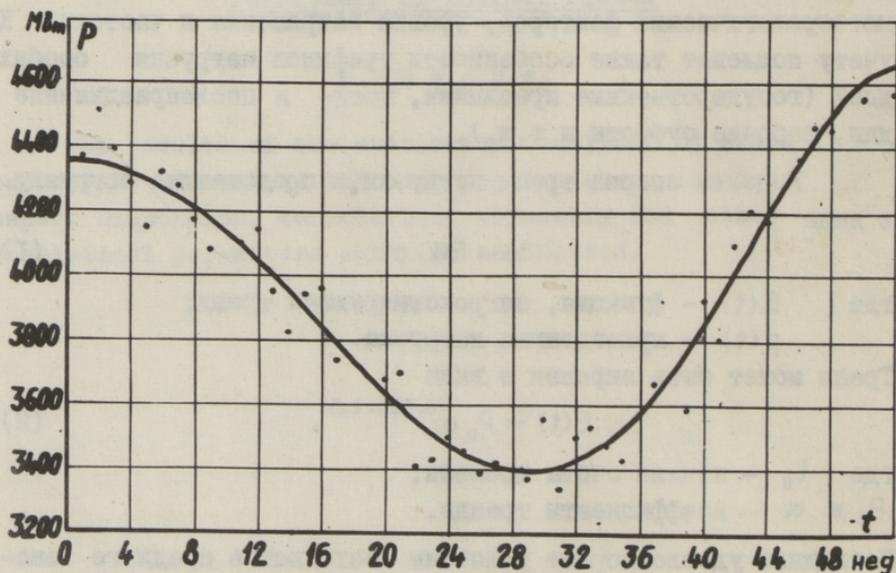
где  $t_0$  - начало счета времени;  
 $P_0$  и  $\alpha$  - коэффициенты тренда.

Последние удовлетворяют условиям постоянства среднего значения математического ожидания приведенной нагрузки за период  $T$ , равный одному году:

$$M[p(t_0)] = M[p(t_0 + T)],$$

$$M\left[\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) dt\right] = 1.$$

Дальнейшее развитие математической модели требует аналитического описания изменения математического ожидания приведенной нагрузки  $p(t)$ . Задача решается сглаживанием плавными кривыми (например, многочленами невысокой степени) совокупностей значений нагрузки, для которых изменение математического ожидания во времени может считаться плавным. Из множества значений нагрузки одного года приведенному условию удовлетворяют значения нагрузки, соответствующие фиксированному моменту времени недели. Следовательно, если рассматривать нагрузку одного года, сглаживанию подлежат подмножества, состоящие из 52 (53) значений нагрузки. Назовем указанные подмножества характерными, а соответствующие сглаживающие кривые — производящими функциями математического ожидания нагрузки. Если, например, нагрузка измеряется в каждый час суток, то для одного года имеем  $7 \times 24 = 168$  характерных подмножеств, а математическое ожидание нагрузки выражается семейством, состоящим из 168 производящих функций. Пример сглаживания одного характерного подмножества приведен на фиг. 1.



Фиг. 1. Пример сглаживания одного характерного подмножества.

Имея значения нагрузки в  $m$  характерные моменты времени недели, получим  $m$  производящих функций, задающих математическое ожидание нагрузки в эти же моменты. В целях получения непрерывного выражения, интерполируем значения математического ожидания для всех остальных моментов времени. Обозначая производящие функции математического ожидания через  $\mu_i(t)$ , соответствующие интерполирующие функции через  $g_i(t)$  и учитывая (I), имеем:

$$M[P(t)] = E(t) \sum_{i=1}^m g_i(t) \mu_i(t). \quad (3)$$

Нормируем производящие функции в целях получения возможности их сравнения:

$$\mu_i^*(t) = \frac{\mu_i(t) - \bar{\mu}_i}{\rho_i}, \quad (4)$$

где

$$\bar{\mu}_i = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \mu_i(t) dt; \quad (5)$$

$$\rho_i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [\mu_i(t) - \bar{\mu}_i]^2 dt}. \quad (6)$$

Семейство нормированных производящих функций (фиг. 2) практически без ущерба для точности можно выразить соотношением

$$\mu_i^*(t) = \mu_0^*(t) + \varepsilon_{1i} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + \varepsilon_{2i} \sin\left(\frac{4\pi}{T}t\right), \quad (7)$$

где  $\mu_0^*(t)$  - некоторая средняя (типовая) производящая функция;

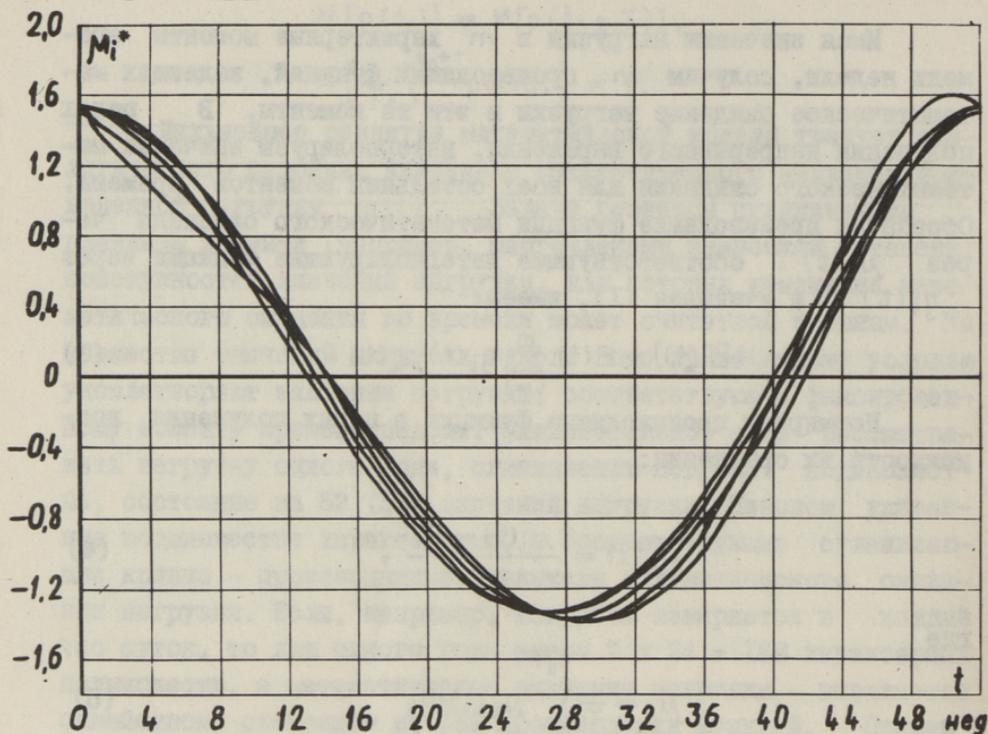
$\varepsilon_{1i}$  и  $\varepsilon_{2i}$  - коэффициенты аппроксимации.

Дисперсия приведенной нагрузки

$$D[p(t)] = M[(p(t) - M[p(t)])^2]$$

может быть выражена аналогично математическому ожиданию как

$$D[p(t)] = \left[ \sum_{i=1}^m g_i(t) \sigma_i(t) \right]^2, \quad (8)$$



Фиг. 2. Семейство нормированных производящих функций.

где  $\sigma_i(t)$  - производящая функция среднеквадратичного отклонения  $i$ -го характерного момента времени. С учетом (I) дисперсия нагрузки выражается формулой

$$D[P(t)] = E^2(t) \left[ \sum_{i=1}^m g_i(t) \sigma_i(t) \right]^2. \quad (9)$$

Рассмотрим нормированный случайный процесс нагрузки

$$\theta(t) = \frac{P(t) - M[P(t)]}{\sqrt{D[P(t)]}}, \quad \sqrt{D[P(t)]}$$

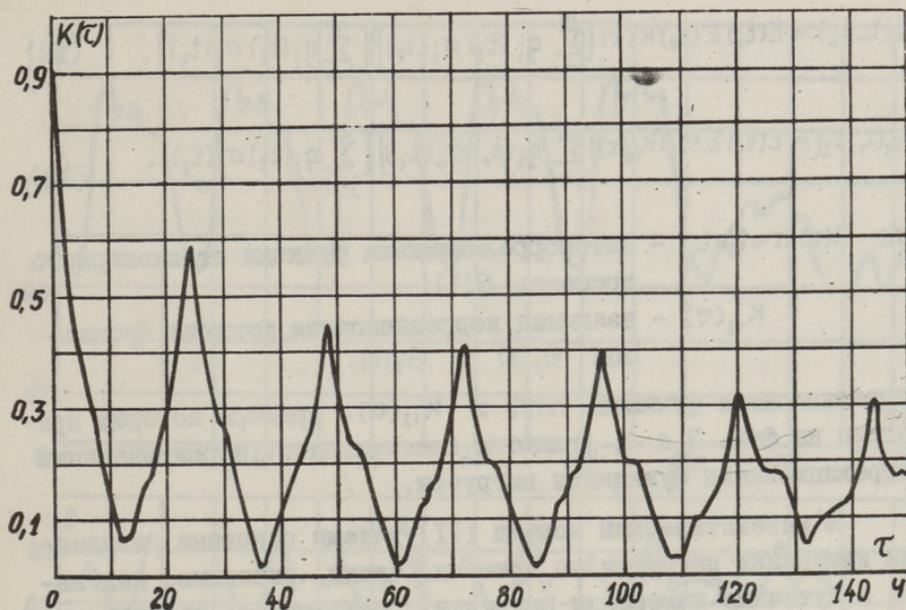
что соответствует представлению нагрузки в виде

$$P(t) = M[P(t)] + \theta(t) \sqrt{D[P(t)]}. \quad (10)$$

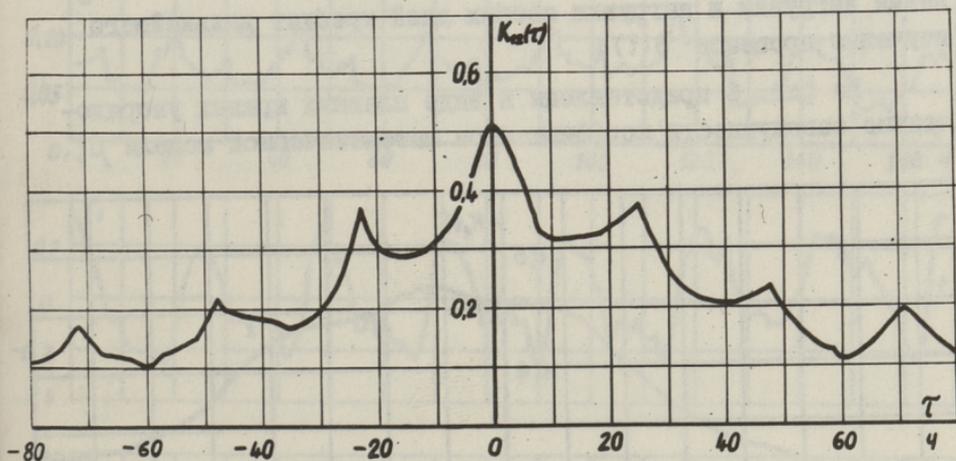
Последнее выражение представляет математическую модель нагрузки, которая с учетом (3) и (8) примет вид

$$P(t) = E(t) \sum_{i=1}^m g_i(t) [\mu_i(t) + \sigma_i(t) \theta(t)]. \quad (11)$$

Очевидно,  $M[\theta(t)] \equiv 0$ ,  $D[\theta(t)] \equiv 1$ . Предполагаем, что процесс  $P(t)$  является стационарным случайным процессом.



Фиг. 3. Автокорреляционная функция нагрузки.



Фиг. 4. Взаимная корреляционная функция двух нагрузок.

Тогда из (II) получим выражения автокорреляционной функции нагрузки  $P(t)$  и взаимную корреляционную функцию некоторых двух нагрузок  $P_1(t)$  и  $P_2(t)$  в виде:

$$K(t_1, t_2) = E(t_1) E(t_2) K(\tau) \left[ \sum_{i=1}^m q_i(t_1) \sigma_i(t_1) \right] \left[ \sum_{j=1}^m q_j(t_2) \sigma_j(t_2) \right], \quad (I2)$$

$$K_{12}(t_1, t_2) = E(t_1) E(t_2) K_{12}(\tau) \left[ \sum_{i=1}^m q_i(t_1) \sigma_i(t_1) \right] \left[ \sum_{j=1}^m q_j(t_2) \sigma_j(t_2) \right], \quad (I3)$$

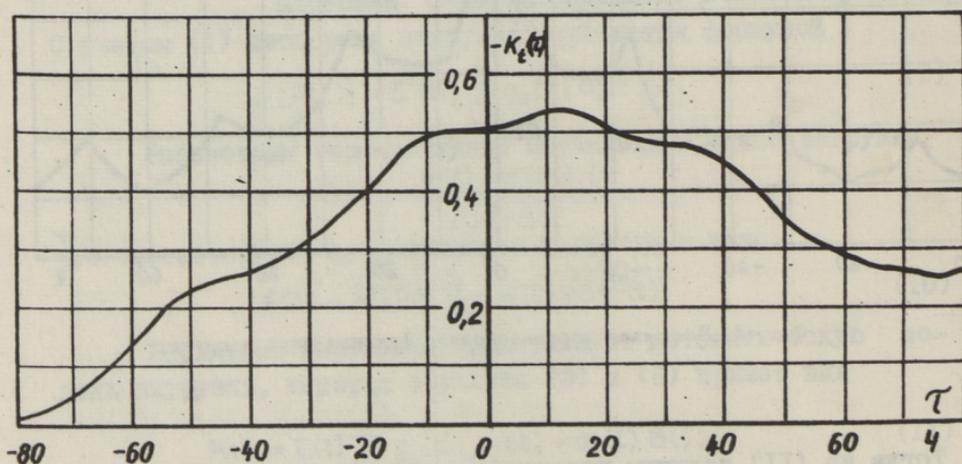
где  $K(\tau)$  ( $\tau = t_2 - t_1$ ) – автокорреляционная функция стационарного процесса  $\theta(t)$ ;

$K_{12}(\tau)$  – взаимная корреляционная функция процессов  $\theta_1(t)$  и  $\theta_2(t)$ .

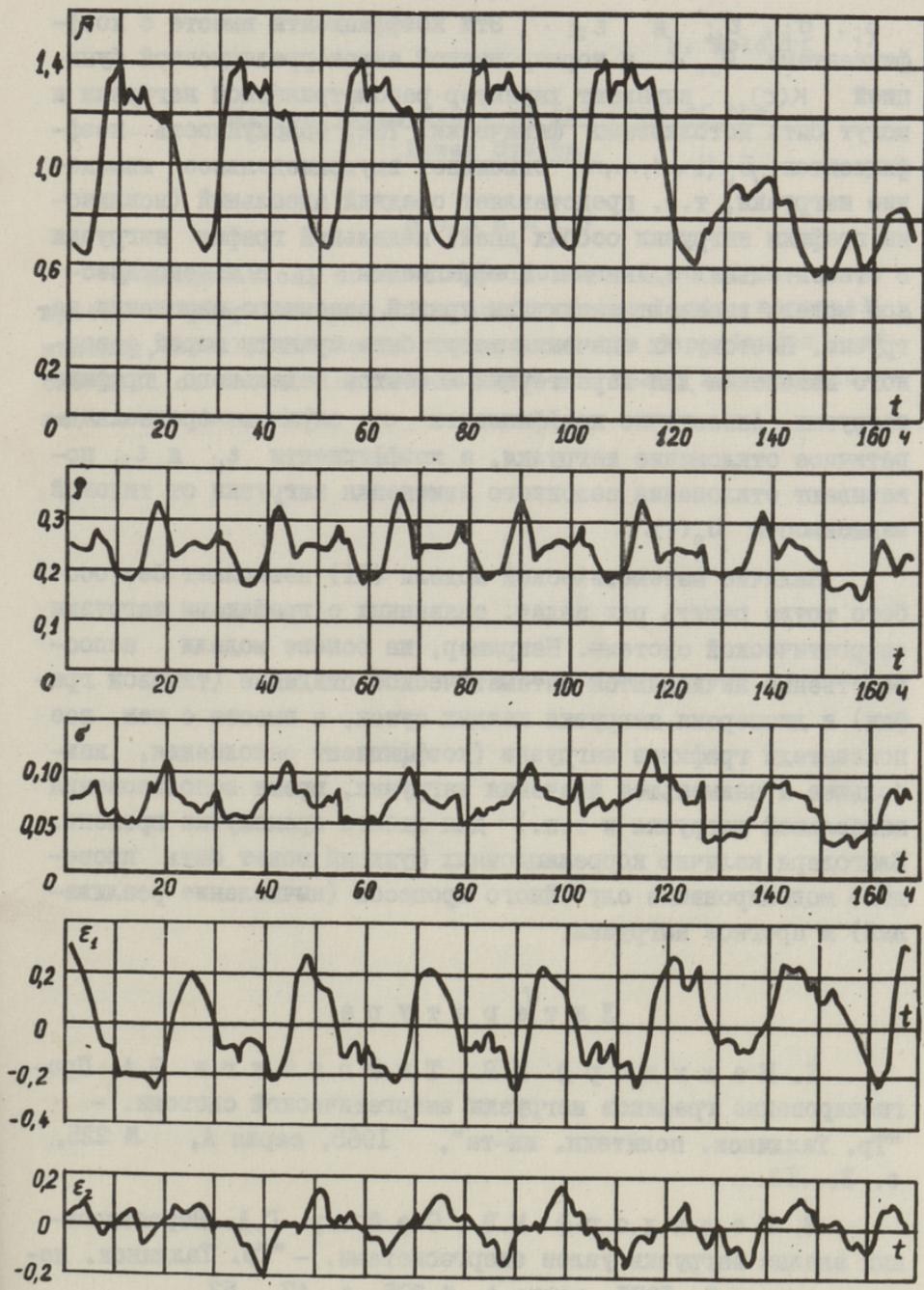
Корреляционные функции  $K(\tau)$  и  $K_{12}(\tau)$ , примеры которых приведены на фиг. 3 и 4, являются одновременно нормированными корреляционными функциями нагрузок.

В математической модели (II) учтены основные тенденции изменения нагрузки во времени (тренд, сезонные, недельные и суточные изменения нагрузки). Зависимость нагрузки от метеорологических факторов, уровня напряжения и частоты может быть учтена посредством соответствующих взаимных корреляционных функций (фиг. 5), выражаемых аналогично взаимной корреляционной функции нагрузок (I3). Учет месячного изменения нагрузки и нагрузки особых дней требует дальнейшего изучения процесса  $\theta(t)$ .

На фиг. 6 представлены в виде плавных кривых упорядоченные совокупности коэффициентов математической модели  $\bar{\mu}_i$ .



Фиг. 5. Взаимная корреляционная функция нагрузки и температуры воздуха.



Фиг. 6. Кривые коэффициентов математической модели.

$\rho_i, \sigma_i, \varepsilon_{1i}$  и  $\varepsilon_{2i}$ . Эти коэффициенты вместе с коэффициентами  $\rho_0, \alpha$  и нормированной автокорреляционной функцией  $K(\tau)$  выражают характер рассматриваемой нагрузки и могут быть истолкованы физически. Так, совокупность коэффициентов  $\bar{\mu}_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) описывает внутринедельное изменение нагрузки, т.е. представляет средний идеальный (исключены графики нагрузки особых дней) недельный график нагрузки в относительных единицах. Коэффициенты  $\rho_i$  в математической модели выражают амплитуды кривой сезонного изменения нагрузки. Поэтому их значения могут быть приняты мерой сезонного изменения для характерных моментов недельного графика нагрузки. Аналогично коэффициенты  $\sigma_i$  выражают среднеквадратичное отклонение нагрузки, а коэффициенты  $\varepsilon_{1i}$  и  $\varepsilon_{2i}$  показывают отклонения сезонного изменения нагрузки от типовой зависимости  $\mu_0(t)$ .

Наличие математической модели (II) позволяет без особого труда решить ряд задач, связанных с графиками нагрузки энергетической системы. Например, на основе модели непосредственно вычисляются математическое ожидание (типовой график) и дисперсия нагрузки каждых суток, а вместе с тем все показатели графиков нагрузки (коэффициент заполнения, наибольшее и наименьшее значения нагрузки, время использования наибольшей нагрузки и т.п.) для любого промежутка времени. Благодаря наличию корреляционных функций может быть проведено моделирование случайного процесса (вычисление реализаций) и прогноз нагрузки.

### Л и т е р а т у р а

1. М е л ь д о р ф М.В., Т и й г и м я г и Э.А. Прогнозирование графиков нагрузки энергетической системы. - "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", 1965, серия А, № 225, с. 3...13.
2. М е л ь д о р ф М.В., С е й е р Г.А. Вероятностный анализ нагрузки узлов энергосистемы. - "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", 1971, серия А, № 305, с. 47...53.

Mathematical Model of the Load of the  
Power System

S u m m a r y

A mathematical model of the summary load of the power system is proposed here. The drift of the load, seasonal, monthly, weekly and daily changes and the dependences of the load on meteorological factors are taken into consideration in the model.

... (mirrored text) ...

... (mirrored text) ...

1. ... (mirrored text) ...

2. ... (mirrored text) ...

УДК 621.311.153

Ю.Э. Треуфельдт

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УЗЛОВЫХ НАГРУЗОК  
 В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Для режимных расчетов электрическая сеть представляется графом, в котором ветвями являются обычно линии электропередачи и трансформаторы, узлы образуются в концах ветвей. Исходя из конкретных задач, выделяется из всей электроэнергетической системы (ЭЭС) некоторая совокупность ветвей и узлов, образующих т.н. расчетную подсистему. Остальную часть ЭЭС можно разделить на т.н. внешние подсистемы, имеющие между собой связи только через расчетную подсистему. Внешние подсистемы связаны с расчетной подсистемой через граничные узлы. Для определения режима расчетной подсистемы задающие режимные переменные граничных узлов должны быть известными. Режимные переменные граничных узлов, являющихся единственными для соответствующих внешних подсистем (узловых подсистем), можно считать независимыми. Для остальных граничных узлов могут быть определены условно независимые переменные (например, решением задачи на более высоком уровне иерархии), либо изменяют соответственно границы расчетной подсистемы до получения узловых подсистем. Узловые подсистемы эквивалентизируются в соответствующих граничных узлах обычно активными ( $P_y$ ) и реактивными ( $Q_y$ ) узловыми нагрузками, которые могут быть представлены в виде

$$P_y = P_n + \pi - \sum_{i=1}^n P_{r_i}, \quad (1)$$

$$Q_y = Q_n + q - \sum_{i=1}^n Q_{r_i} - \sum_{j=1}^m Q_{k_j} - Q_\lambda, \quad (2)$$

- где  $P_n$  и  $Q_n$  — суммарные активная и реактивная нагрузки потребителей в узловой подсистеме;
- $\pi$  и  $q$  — суммарные потери активной и реактивной мощностей в узловой подсистеме;
- $P_{gi}$  и  $Q_{gi}$  — активная и реактивная нагрузки  $i$ -ой электростанции (генератора);
- $Q_{kj}$  — реактивная нагрузка  $j$ -го компенсирующего устройства;
- $Q_\Lambda$  — суммарная реактивная мощность, генерируемая линиями узловой подсистемы.

Для определения  $P_y$  и  $Q_y$  значения составляющих в (1) и (2) должны быть известными. Нагрузки генерирующих источников  $P_{gi}$ ,  $Q_{gi}$  и  $Q_{kj}$  обычно определяются по заданным для них графикам, либо вычисляются в ходе оптимизационных расчетов. Реактивную мощность  $Q_\Lambda$ , генерируемую линиями, можно приближенно вычислить по номинальным напряжениям рассматриваемых линий узловой подсистемы. Суммарные нагрузки потребителей  $P_n$  и  $Q_n$  образуются в результате функционирования потребителей, подключенных к узловой подсистеме.

Иногда к узловой подсистеме подключен потребитель (или потребители), нагрузка которого существенно влияет на суммарную нагрузку узла, а характер потребления требует отдельного анализа. Обозначив суммарную нагрузку таких потребителей через  $P_{n1}$  и  $Q_{n1}$ , а суммарную нагрузку остальных потребителей через  $P_{n2}$  и  $Q_{n2}$ , получим

$$P_n = P_{n1} + P_{n2}, \quad (3)$$

$$Q_n = Q_{n1} + Q_{n2}. \quad (4)$$

Нагрузки  $P_{n1}$  и  $Q_{n1}$  могут быть определены либо исходя из анализа функционирования отдельных элементов потребления с помощью т.н. синтетических методов, либо по заданным для них графикам, если такие графики имеются.

Для определения нагрузок  $P_{n2}$  и  $Q_{n2}$  могут быть применены статистические методы моделирования. Однако из-за отсутствия данных для определения потерь мощности  $\pi$  и  $q$  в узловой подсистеме, моделируемыми являются активная и реактивная нагрузки  $P$  и  $Q$ :

$$P = P_{n2} + \pi, \quad (5)$$

$$Q = Q_{n2} + q. \quad (6)$$

Нагрузки  $P$  и  $Q$  моделируются на основе данных об их предыстории, которые с учетом (I)...(6) вычисляются как

$$P = P_y + \sum_{i=1}^n P_{r_i} - P_{n1}, \quad (7)$$

$$Q = Q_y + \sum_{i=1}^n Q_{r_i} + \sum_{j=1}^m Q_{k_j} + Q_{\Lambda} - Q_{n1}. \quad (8)$$

При этом измерительные данные, по которым вычисляются  $P$  и  $Q$ , должны быть зафиксированы одновременно. Полнота информации о предыстории нагрузок  $P$  и  $Q$  зависит от количества одновременных измерений их составляющих в рассматриваемом периоде времени. Если дискретизация измерений по времени равна требуемой дискретизации прогнозов узловых нагрузок, то можем условно говорить о полной информации о нагрузках. В настоящее время принята часовая дискретизация нагрузок, однако далеко не от всех точек измерений поступают часовые данные. Согласно этому можно моделируемые нагрузки разделить на два типа - нагрузки с полной и нагрузки с неполной исходной информацией [1].

Очевидно, точность оценивания параметров математической модели зависит от степени полноты исходной информации. Для повышения точности параметров математической модели нагрузки с неполной информацией, предлагается определить эти параметры с учетом как имеющихся данных, так и математической модели некоторой соответственно выбранной представительной нагрузки. В качестве представительной нагрузки, в принципе, может быть любая моделируемая нагрузка с полной информацией. Чем ближе по характеру представительная и рассматриваемая нагрузки, тем точнее будут полученные параметры. При этом желательно, чтобы обе нагрузки находились в одинаковых географических и метеорологических условиях.

Имея математические модели нагрузок  $P$  и  $Q$ , можно получить выражения для определения узловых нагрузок  $P_y$  и  $Q_y$  в виде

$$P_y = P + P_{н1} - \sum_{i=1}^n P_{Гi}, \quad (9)$$

$$Q_y = Q + Q_{н1} - \sum_{i=1}^n Q_{Гi} - \sum_{j=1}^m Q_{Кj} - Q_{Л}. \quad (10)$$

### Л и т е р а т у р а

И. Вальтин Ю.Ю., Луберг Х.Ю., Мельдорф М.В., Перкман И.Э., Сааренд К.А., Тийгмяги Э.А., Треуфельдт Ю.Э. Прогнозирование графиков нагрузок узлов энергосистемы. - В кн.: "Тезисы 2 Республиканской конференции ЭССР. Проблемы оптимизации в электроэнергетике", Таллин, 1974, с.42...43.

Ü. Treufeldt

#### About Determination of the Bus-Loads at the Power System

#### S u m m a r y

The paper gives the analysis of the bus-load on the grounds of its components.

УДК 621.311.153

Ю.Ю. Вальтин, М.В. Мельдорф,  
П.Х. Разсаар, Э.А. Тийгимяги,  
Ю.Э. Треуфельдт

## О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ НАГРУЗОК УЗЛОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Разработанные в настоящее время методы моделирования узловых нагрузок можно условно разделить на две характерные группы.

В первую группу можно отнести методы, по которым модель суммарной нагрузки узла составляется исходя из анализа функционирования отдельных потребителей или приемников, как, например, в работах [1,2]. Назовем такие методы синтетическими. Синтетические методы успешно, а во многих случаях даже неизбежно, применяются для моделирования отдельных элементов системы электроснабжения и нагрузок узлов распределительных сетей со сравнительно небольшим количеством потребителей. При моделировании нагрузок более крупных узлов со сравнительно большим количеством потребителей, как, например, нагрузок узлов электроэнергетической системы (ЭЭС), использование синтетических методов обычно сопряжено с практически непреодолимыми трудностями учета огромного количества составляющих суммарных нагрузок узлов. Поэтому использование синтетических методов моделирования при крупных нагрузках связано с внесением ряда упрощающих допущений, приводящих к большим погрешностям. Тем не менее, при моделировании нагрузок узлов ЭЭС синтетические методы могут быть использованы как дополняющие и уточняющие в случае существенных изменений в структуре потребления, а также при наличии потребителей или приемников, нагрузки которых требуют отдельного анализа.

Для моделирования нагрузок узлов ЭЭС обычно более целесообразно применение методов второй группы – т.н. статистических методов, по которым нагрузка узла моделируется на основе данных о ее предьстории. Преимуществом статистических методов является независимость объема расчетов от количества составляющих потребителей, что делает эти методы приемлемыми для моделирования нагрузок разных узлов ЭЭС.

В последнее время в области статистического моделирования издавался ряд работ, различных по методу описания и точности определения математического ожидания и других вероятностных характеристик нагрузки [3...6 и др.] Более совершенными из них, всесторонне описывающими характер изменения нагрузки, можно считать работы [5,6]. В настоящей статье для определения нагрузки узла ЭЭС используется статистическая модель в виде нестационарного случайного процесса [6]. Модель, включающая ряд детерминированных параметров и нормированный стационарный случайный процесс, имеет вид

$$P(t) = E(t) \sum_{i=1}^m g_i(t) \{ \mu_i(t) + \sigma_i(t) [\theta(t) + \delta(t)] \}. \quad (II)$$

- где  $E(t)$  – функция, описывающая тренд нагрузки;  
 $\mu_i(t)$  и  $\delta(t)$  – функции, описывающие соответственно основные (сезонное, недельное, суточное) и дополнительные (месячное, квартальное и др.) тенденции изменения нагрузки;  
 $\sigma_i(t)$  – функция, описывающая среднеквадратичные отклонения нагрузки (для практических расчетов можно принять  $\sigma_i(t) = \sigma_i$ );  
 $g_i(t)$  – интерполирующая функция;  
 $m$  – количество характерных моментов времени недели;  
 $\theta(t)$  – нормированный стационарный случайный процесс.

Функции  $\mu_i(t)$  ( $i=1, \dots, m$ ), описывающие сезонное, недельное и суточное изменения нагрузки, выражаются в виде

$$\mu_i(t) = \left( S_0(t) + \Delta S_i(t) \right) g_i \left[ \mu_0(t) + \varepsilon_{i1} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) + \varepsilon_{i2} \sin\left(\frac{4\pi}{T} t\right) \right] g_i + \bar{\mu}_i, \quad (2)$$

где  $\mu_0(t)$  – функция, описывающая среднее сезонное изменение нагрузки;

$\bar{\mu}_i, \rho_i, \varepsilon_{1i}$  и  $\varepsilon_{2i}$  ( $i=1, \dots, m$ ) — коэффициенты функций  $\mu_i(t)$ .

Согласно модели (I) и учитывая, что для нормированного стационарного процесса  $\theta(t)$   $M[\theta(t)] = 0$  и  $D[\theta(t)] = 1$ , имеем выражения для математического ожидания и дисперсии нагрузки соответственно

$$M[P(t)] = E(t) \sum_{i=1}^m g_i(t) [\mu_i(t) + \sigma_i \delta(t)], \quad (3)$$

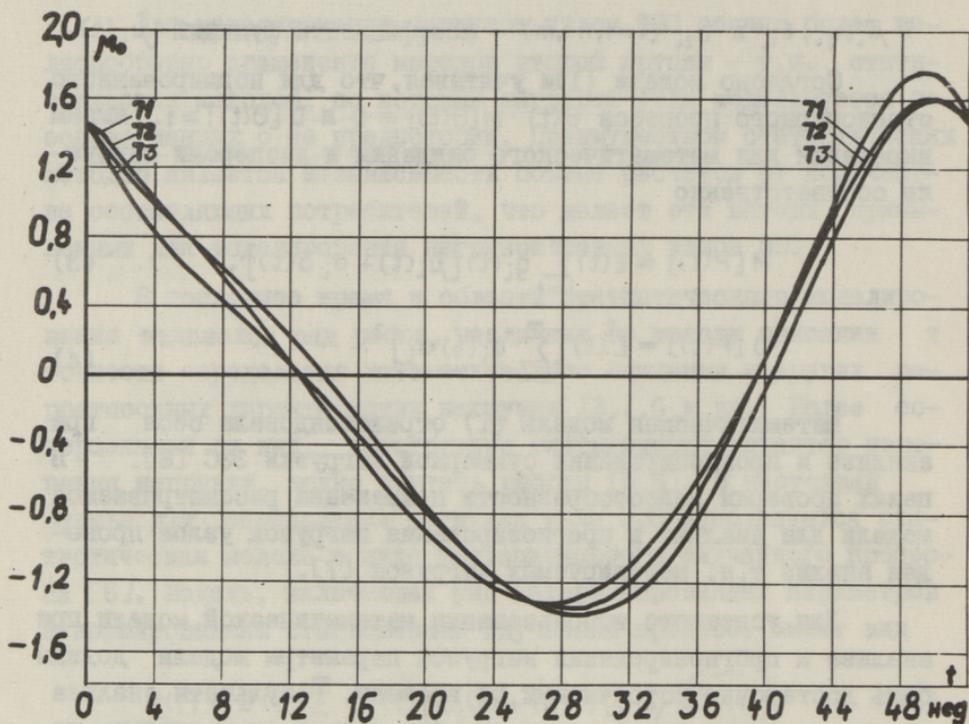
$$D[P(t)] = E^2(t) \left[ \sum_{i=1}^m g_i(t) \sigma_i \right]^2. \quad (4)$$

Математическая модель (I) отрекомендовала себя при анализе и прогнозировании суммарной нагрузки ЭЭС [6]. В целях проверки целесообразности применения рассматриваемой модели для анализа и прогнозирования нагрузок узлов проведен анализ т.н. моделируемых нагрузок [7].

Для успешного использования математической модели при анализе и прогнозировании нагрузок параметры модели должны быть достаточно устойчивыми во времени. Результаты анализа нагрузок разных узлов в разные годы подтвердили высокую устойчивость параметров их моделей во времени. На фиг. 1 и 2 изображены характерные для модели графики при активной нагрузке узла со средней мощностью 3 МВт в 1971–1973 гг. На фиг. 2 приведены недельные графики  $\bar{\mu}(t_n)$ ,  $\rho(t_n)$ ,  $\sigma(t_n)$ ,  $\varepsilon_1(t_n)$  и  $\varepsilon_2(t_n)$ , характерные для соответствующих коэффициентов  $\bar{\mu}_i$ ,  $\rho_i$ ,  $\sigma_i$ ,  $\varepsilon_{1i}$  и  $\varepsilon_{2i}$  модели. Высокая устойчивость параметров модели во времени создает хорошие условия для краткосрочного прогнозирования и свидетельствует о применимости рассматриваемой модели даже для долгосрочного прогнозирования нагрузок узлов ЭЭС.

Эффективность модели может быть оценена по среднеквадратичным отклонениям нагрузок, которые по настоящей модели в среднем находятся в пределах от 2 % для больших нагрузок (1000 МВт и больше) до 8 % для мелких нагрузок (10 МВт и меньше).

При краткосрочном прогнозировании нагрузок уточнение прогнозов получается за счет учета текущей реализации прогнозируемой нагрузки, а также статистических связей между

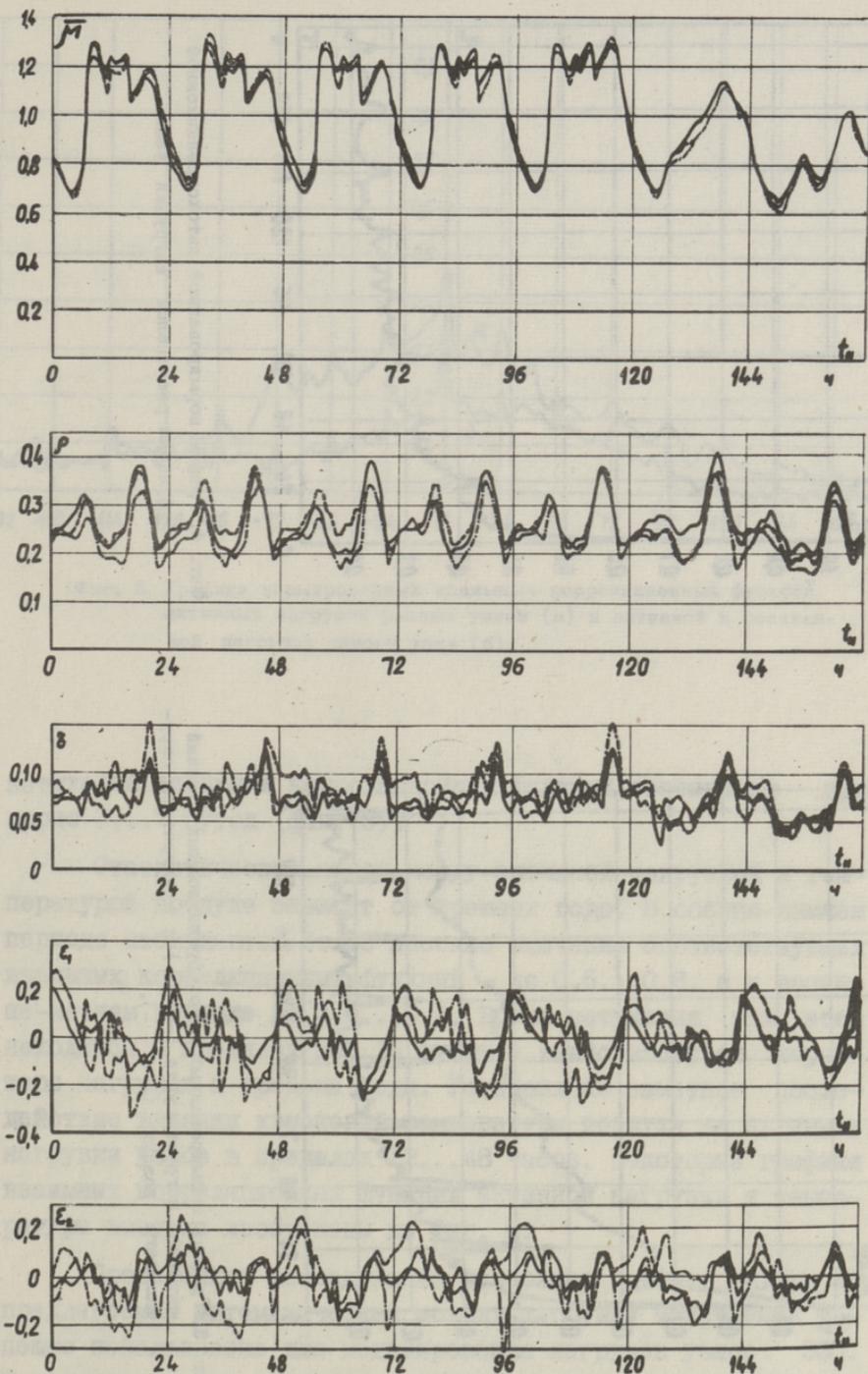


Фиг. 1. Графики  $\mu_0(t)$  при активной нагрузке узла в разные годы.

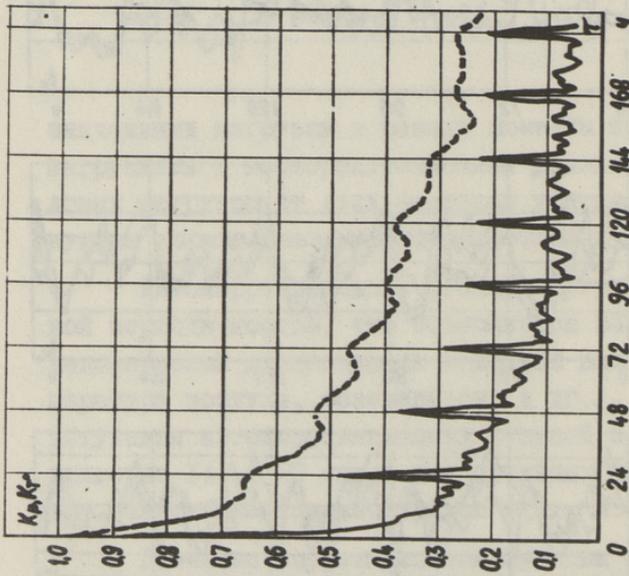
значения нагрузки в разные моменты времени между разными нагрузками и метеорологическими условиями. Зависимости узловых нагрузок от этих факторов учитываются по соответствующим нормированным корреляционным функциям.

Автокорреляционные функции нагрузок обладают 24-часовой периодичностью, что объясняется 24-часовой ритмичностью человеческой деятельности и других влияющих факторов (температура воздуха, освещенность и др.). Время практического затухания автокорреляционных функций по их пикам составляет примерно 14... 20 суток для активных (фиг.3) и 12...16 суток для реактивных нагрузок узлов (фиг. 4).

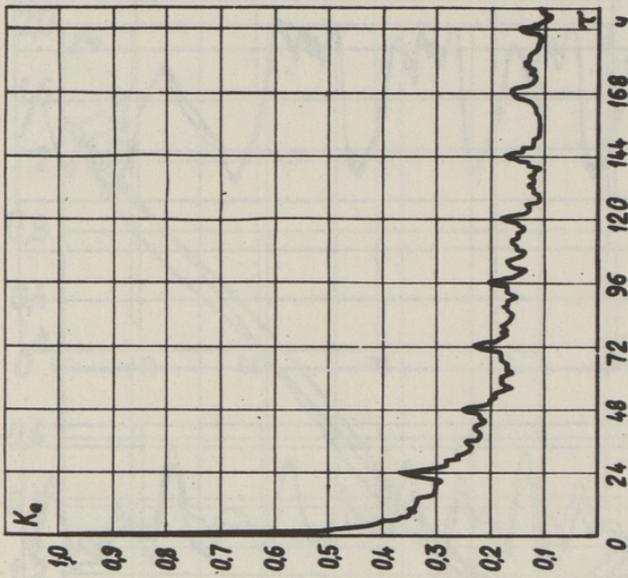
Взаимные корреляционные функции разных нагрузок также обладают 24-часовой периодичностью. При этом их пики, как правило, не превышают значений 0,4...0,6 при разных активных и 0,3...0,4 при активных и реактивных нагрузках. Время



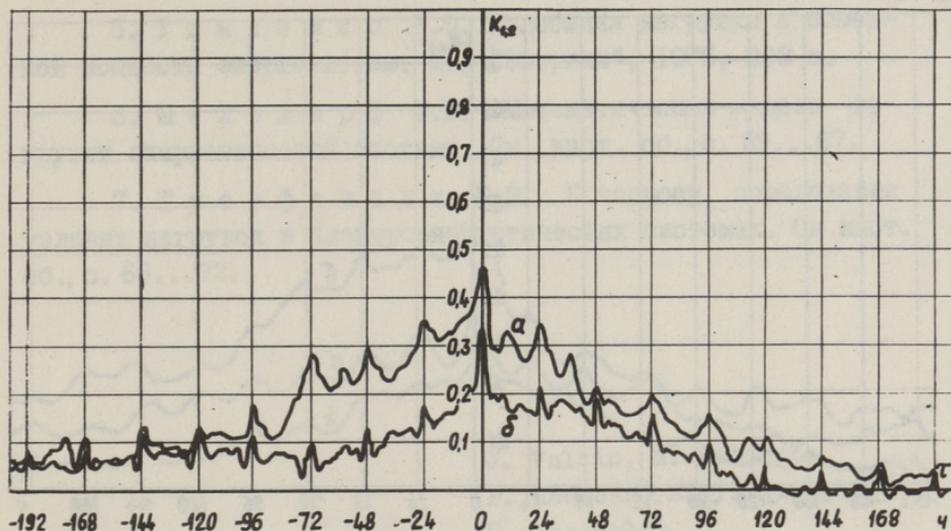
Фиг. 2. Недельные графики  $\bar{p}(t_n)$ ,  $q(t_n)$ ,  $\sigma(t_n)$ ,  $\varepsilon_1(t_n)$  и  $\varepsilon_2(t_n)$  при активной нагрузке узла в разные годы.



Фиг. 3. Графики нормированных автокорреляционных функций активной нагрузки узла (—) и температуры окружающего воздуха (---).



Фиг. 4. График нормированной автокорреляционной функции реактивной нагрузки узла.

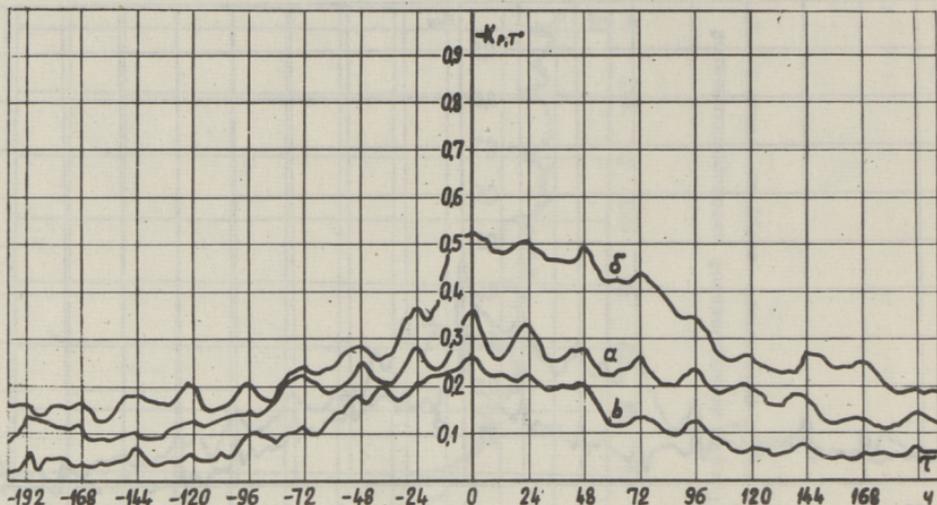


Фиг. 5. Графики нормированных взаимных корреляционных функций активных нагрузок разных узлов (а) и активной и реактивной нагрузок одного узла (б).

затухания взаимных корреляционных функций составляет примерно 3...7 суток (фиг. 5).

Статистические связи между активной нагрузкой и температурой воздуха зависят от времени года. В осенне-зимнем периоде наблюдаются более высокие значения соответствующих взаимных корреляционных функций – до 0,5...0,8, а в весенне-летнем периоде до 0,2...0,4. Время затухания при этом находится в пределах 5...15 суток в зависимости от характера нагрузки и времени года. Установлено заметное последствие влияния изменений температуры воздуха на активные нагрузки узлов в пределах 12...48 часов. Некоторые графики взаимных корреляционных функций активной нагрузки и температуры воздуха изображены на фиг. 6.

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что предлагаемая математическая модель нагрузки может быть успешно использована для моделирования нагрузок узлов ЭЭС. Подтверждена возможность применения рассматриваемой модели как при краткосрочном, так и при долгосрочном прогнозировании узловых нагрузок.



Фиг. 6. Графики нормированных взаимных корреляционных функций активной нагрузки узла и температуры окружающего воздуха в разные периоды времени ( а - среднегодовой , б - зимний, в - летний).

## Л и т е р а т у р а

1. Н е р с е с я н Е.А. Моделирование на ЭЦВМ вероятных режимов нагрузок трансформаторов городских сетей методом статистических испытаний. - "Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт", 1968, № 5, с. 134...139.

2. С о л д а т к и н а Л.А., Ф о к и н Ю.А., А б у Э л ь-Х е й р М.Х. О некоторых особенностях моделирования на ЦВМ суточных графиков коммунально-бытовой нагрузки методом статистических испытаний. - "Известия вузов. Энергетика", 1973, № II, с. 10...14.

3. К о н о в а л о в Ю.С., К р у м м Л.А., К у г е л е в и ч у с И.Б. Определение обобщенных характеристик нагрузок сложных энергетических систем. - "Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт", 1972, № 2, с. 82...93.

4. Ф о к и н Ю.А., Р е з н и к о в И.Г. Аналитическое описание случайного процесса нагрузки электрической системы и ее узлов. - "Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт", 1975, № 3, с. 113...119.

5. Т и м ч е н к о В.Ф. Колебания нагрузки и обмен-  
ной мощности энергосистем. М., "Энергия", 1975, 208 с.

6. М е л ь д о р ф М.В. Математическая модель на-  
грузки энергетической системы. См. наст. сб., с. 59...67.

7. Т р е у ф е л ь д т Ю.Э. К вопросу определения  
узловых нагрузок в электроэнергетических системах. См. наст.  
сб., с. 69...72.

J. Valtin, M. Meldorf,  
P. Raesaar, E. Tiigimägi,  
Ü. Treufeldt

Mathematical Simulation of the Bus-Load  
of the Power System

S u m m a r y

A mathematical model describing bus-load as non-  
stationary stochastic process is proposed here. High  
stability in time of the parameters of the model for  
various bus-loads is fixed. The fitness of the given  
model, both in case of short-term and long-term fore-  
casts of bus-loads, is proved.



УДК 621.311.153

Ю.Ю.Вальтин, М.В. Мельдорф,  
 Э.А.Тийгимяги, Ю.Э.Треуфельдт

ВОПРОСЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАГРУЗОК УЗЛОВ  
 ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Прогнозирование нагрузки узлов электроэнергетической системы (ЭЭС) со временем опережения от одного часа до 1 ... 2 лет предполагает наличие математической модели, в которой выражены все основные тенденции изменения нагрузки во времени и зависимость нагрузки от влияющих факторов. Ниже рассматриваются вопросы прогноза нагрузки на основе математической модели, описанной в [1] и [2].

Указанная математическая модель выражает нагрузку в виде нестационарного случайного процесса:

$$P(t) = P_0 e^{\alpha(t-t_0)} \sum_{i=1}^m g_i(t) [\mu_i(t) + \sigma_i(\Theta(t) + \delta(t))], \quad (I)$$

где  $P_0$  и  $\alpha$  - коэффициенты, задающие тренд нагрузки;

$g_i(t)$  - интерполирующая функция;

$m$  - количество рассматриваемых (характерных) моментов времени в недели;

$\mu_i(t)$  - функция, описывающая сезонное изменение математического ожидания нагрузки  $i$ -го часа недели;

$\sigma_i(t)$  - среднеквадратичное отклонение нагрузки  $i$ -го часа недели;

$\delta(t)$  - функция, учитывающая месячные и квартальные изменения нагрузки;

$\Theta(t)$  - нормированный стационарный случайный процесс.

Приведенная математическая модель описывает, таким

образом суточные, недельные, месячные, квартальные и сезонные изменения нагрузки, а также тренд нагрузки на уровне математического ожидания и дисперсии. Моделированию подлежат все нагрузки из общей совокупности нагрузок системы и некоторые метеорологические факторы. Взаимосвязи между отдельными нагрузками, а также между нагрузками и метеорологическими факторами учитываются с помощью взаимных корреляционных функций. Отдельно моделируются нагрузки особых дней (праздники, рабочие субботы, пред- и послепраздничные дни и т.п.).

Понимая под прогнозом нагрузки ее условное математическое ожидание, определяемое в предложении, что известна текущая реализация (предыстория) нагрузки до заданного момента времени, имеем, согласно (I), выражение прогноза нагрузки в виде

$$M_y [P(t)] = P_0 e^{\alpha(t-t_0)} \sum_{i=1}^m q_i(t) \{ \mu_i(t) + \sigma_i(t) [M_y [\theta(t)] + \delta(t)] \}, \quad (2)$$

где  $M_y [\theta(t)]$  – условное математическое ожидание (прогноз) процесса  $\theta(t)$ .

Прогноз процесса  $\theta(t)$  может быть вычислен формулой линейной экстраполяции:

$$M_y [\theta(t)] = \sum_k \sum_i r_{ki} \theta_{ki}, \quad (3)$$

где  $r_{ki}$  – коэффициент экстраполяции  $k$ -го фактора для  $i$ -го момента предыстории;  
 $\theta_{ki}$  – значение реализации процесса  $\theta_k(t)$   $k$ -го фактора в  $i$ -й момент предыстории.

Посредством прогноза процесса  $\theta(t)$  учитывается, таким образом, предыстория рассматриваемой нагрузки, а также влияние на нагрузку ряда факторов. При прогнозировании нагрузки узлов в качестве влияющих факторов могут быть рассмотрены, прежде всего, сопряженная нагрузка (реактивная нагрузка для активной и наоборот), представительная нагрузка (см. ниже) и температура воздуха.

Так как автокорреляционные функции нагрузок узлов и их взаимные корреляционные функции практически затухают в течение времени порядка 10 суток, значение прогноза процесса  $\theta(t)$  при времени опережения, превышающем 10 суток,

практически равняется нулю. Прогноз нагрузки совпадает тогда с безусловным математическим ожиданием:

$$M[P(t)] = P_0 e^{\alpha(t-t_0)} \sum_{i=1}^m g_i(t) [\mu_i(t) + \sigma_i(t) \delta(t)]. \quad (4)$$

Объем вычислений для определения безусловного математического ожидания намного меньше по сравнению с вычислением прогноза процесса  $\Theta(t)$ . Поэтому в ряде случаев целесообразно ограничиваться вычислением прогноза по формуле (4) и при времени опережения, не превышающем одну неделю. В связи с этим назовем математические ожидания, определенные по формулам (4) и (2), соответственно предварительным  $P_{п.пр}$  и уточненным  $P_{у.пр}$  прогнозами, а их разность — коррекцией предварительного прогноза. Последняя, согласно (2) и (4), выражается в виде:

$$P_{к.пр} = P_0 e^{\alpha(t-t_0)} \sum_{i=1}^m g_i(t) \sigma_i(t) M_y [\Theta(t)].$$

Исследования показали, что коэффициенты математических моделей нагрузок узлов электроэнергетической системы оказываются весьма устойчивыми во времени. Это обеспечивает стабильную точность предварительного прогноза в широком диапазоне опережения. Однако по мере изменения характера нагрузки требуется периодический (например, раз в год) пересчет коэффициентов математических моделей. Ввиду большого количества узлов в системе такой пересчет может оказаться весьма трудоемким. Поэтому целесообразно применять адаптацию коэффициентов математической модели, которая выполняется при каждом вводе фактических данных о нагрузках в ЦВМ. Адаптации подвергаются также коэффициенты коррекции предварительного прогноза  $\Gamma_{ki}$ .

Согласно принятой методике прогнозирования шаг дискретизации времени для всех нагрузок одинаков (обычно 1 час). Таким же интервалом необходимо выбрать характерные моменты времени недели при определении коэффициентов математической модели. В то же время фактические значения нагрузок ряда узлов фиксируются лишь несколько раз в сутки (т.н. узлы с неполной информацией), вследствие чего часть из коэффициентов математических моделей этих нагрузок остается неопределенной. Отсутствующие коэффициенты могут быть оценены интерполяцией значений коэффициентов на ос-

нове подобия математических моделей нагрузок различных узлов или подсистем. Поэтому для каждого узла с неполной информацией выбирается некоторая нагрузка с полной информацией, называемой представительной относительно данного узла. Представительная нагрузка может быть общей для ряда узлов. Она выбирается на основе подобия математических моделей нагрузок и по сходству структуры нагрузок. Интерполяция производится при первоначальном составлении математических моделей нагрузок узлов, а также в ходе расчета одновременно с адаптацией коэффициентов моделей.

### Л и т е р а т у р а

1. М е л ь д о р ф М.В. Математическая модель нагрузки энергетической системы. См. наст. сб., с. 59...67.

2. В а л ь т и н Ю.Ю., М е л ь д о р ф М.В., Р а э с а а р П.Х., Т и й г и м я г и Э.А., Т р е у ф е л ь д т Ю.Э. О математическом моделировании нагрузок узлов электроэнергетической системы. См. наст. сб., с.73...81.

J. Valtin, M. Meldorf,  
E. Tiigimägi, Ü. Treufeldt

### Questions of the Bus-Load Forecasting of a Power System

#### S u m m a r y

A method of forecasting the bus-load and reactive bus-load on the grounds of previously prepared mathematical models is described here. Supply level of initial data and necessity of the coefficients adaptation are taken into account.

УДК 621.311.153

Ю.Д.Вальтин, М.В.Мельдорф

### ПРОГРАММА АНАЛИЗА И ПРОГНОЗА НАГРУЗОК УЗЛОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассматриваемая программа выполняет анализ и прогноз нагрузок узлов ЭЭС на основе методики, приведенной в [1] и [2]. Значительное место в программе отведено первоначальной обработке и подготовке к хранению исходных данных — реализации нагрузок и метеорологических факторов.

Анализ нагрузок в программе сводится к вычислению коэффициентов математических моделей и различных показателей (корреляционных функций, коэффициентов заполнения и др.). Согласно принятой методике все рассматриваемые величины (активные и реактивные нагрузки узлов и подсистем, а также метеорологические факторы), которые мы будем называть факторами нагрузки, описываются одной и той же математической моделью. Поэтому в программе данные о факторах обрабатываются по одному и тому же алгоритму, независимо от их физической сущности. Одновременно рассматриваются один или два фактора, определенных во временном аспекте в пределах одного, как правило, календарного года. Результаты анализа служат исходным материалом для первоначального формирования коэффициентов прогноза нагрузки.

Прогноз нагрузки, согласно [2], делится на предварительный и уточненный. Последний получается корригированием предварительного прогноза на основе предьстории факторов за последние 10 суток. Коррекция прогноза практически значима при времени опережения, не превышающем 7...10 суток. Прогноз определяется на основе коэффициентов математических моделей и коррекции прогноза. В программе предусмотрена адаптация этих коэффициентов по мере накопления статистического материала. Их первоначальные значения определяются анализом нагрузки. Прогноз выполняется одновременно для ря-

да взаимно связанных факторов нагрузки. Практически множество факторов нагрузки системы можно разбить на подмножества, элементы которых имеют взаимные связи только внутри этих подмножеств. Такие подмножества мы будем называть замкнутыми совокупностями факторов нагрузки. Прогнозирование выполняется тогда одновременно для всех факторов, входящих в замкнутую совокупность.

В целях упрощения размещения на магнитных лентах (МЛ) и магнитном барабане (МБ), а также обмена между устройствами ЦВМ весьма разнообразной информации, все данные о факторах нагрузки объединяются в файлы. В программе применяются разные структуры файлов для анализа и для прогноза нагрузки. В обоих случаях в одном файле содержится вся необходимая информация об одном факторе нагрузки за определенное время. Во время расчетов соответствующие файлы находятся на МБ. Для длительного хранения файлы переписываются на МЛ.

Разнообразие вычислительных операций, подлежащих выполнению при анализе и прогнозировании нагрузки, привело к отказу от обычной структуры программы (блок ввода исходных данных, блок преобразований, блок вывода результатов). Вместо этого применена модульная структура. Под модулем здесь понимается элемент программы, выполняющий определенное физически осмысленное и законченное преобразование информации. Содержание конкретного вычислительного процесса (включая ввод начальных данных и вывод результатов) определяется набором и порядком чередования отдельных модулей, задаваемым управляющей информацией в виде т.н. директив. Всего в программе насчитывается 16 модулей, на основе которых можно составлять большое количество различных вычислительных процессов.

Модули оформлены в виде подпрограмм. Обмен информации между ними производится посредством МБ. Параметрами модулей определяется режим их работы. Задачей основной программы является организация обращений к модулям. Так как в этих целях используются также некоторые подпрограммы, будем в дальнейшем вместо основной программы говорить об управляющей программе.

Порядок следования модулей в вычислительном процессе и их параметры задаются в директивах. В простейшем случае директива содержит номер выполняемого модуля и значения па-

раметров (количество параметров до 12). Такую директиву назовем простой директивой. Поскольку в конкретных задачах анализа и прогнозирования нагрузки требуется, как правило, многократное использование различных модулей, в программе реализованы и более сложные формы директив – комплексные и обобщенные директивы. Последние содержат исходную информацию, на основе которой управляющая программа вырабатывает простые директивы.

Комплексная директива состоит из ряда простых директив с указанием кратности их выполнения (цикл простой директивы) и кратности выполнения комплекса в целом (цикл комплекса). Кроме того, введено понятие вспомогательной директивы, задачей которой является преобразование параметров простой директивы в циклах.

Обобщенная директива состоит из заголовка и тела. Заголовок включает название директивы и до 12 значений параметров. Структура тела обобщенной директивы совпадает со структурой комплексной директивы. Однако часть параметров простых директив, содержащихся в теле, может не иметь числовых значений. Значения таких параметров определяются специальными процедурами на основе значений параметров обобщенной директивы, приведенных в заголовке.

Обобщенной директиве присваивается также номер, заменяющий при необходимости ее название. Вследствие того заголовок обобщенной директивы совпадает по структуре с простой директивой и может стать в свою очередь элементом некоторой другой обобщенной директивы. Таким образом, можно создать иерархическую структуру директив, значительно увеличивающую гибкость управления программой.

Комплексные директивы вводятся с перфокарт (ПК) и подлежат выполнению непосредственно. Для обобщенных директив с ПК вводятся только их заголовки. Тела директив подготавливаются предварительно и хранятся на МЛ.

Помимо организации вычислительного процесса, управляющая программа сигнализирует об ошибках, возникающих вследствие неправильной подготовки исходных данных или директив. Предусмотрена возможность анализа этих ошибок при помощи специального модуля.

Программа выполнена на языке ФОРТРАН для ЦВМ М-222. Предусмотрено использование МБ и одного или нескольких МЛ. На магнитной ленте хранятся подпрограммы (программа включает свыше 100 подпрограмм), исходные данные для анализа и прогноза, коэффициенты математических моделей и коррекций прогноза, а также некоторая управляющая информация (тела обобщенных директив). Количество МЛ зависит от числа рассматриваемых узлов (факторов) и объема хранимой исходной информации. Время вычисления коэффициентов математической модели для одного фактора составляет 15 минут. Время определения предварительного прогноза для одного фактора на одни сутки составляет примерно 2 с, независимо от времени опережения прогноза. Время вычисления уточненного прогноза для одного фактора составляет примерно 20 с на каждые сутки опережения прогноза.

#### Л и т е р а т у р а

1. В а л ь т и н Ю.Ю., М е л ь д о р ф М.В., Р а э - с а а р П.Х., Т и й г и м я г и Э.А., Т р е у ф е л ь д т Ю.Э. О математическом моделировании нагрузок узлов электроэнергетической системы. См. наст. сб., с. 73...81.

2. В а л ь т и н Ю.Ю., М е л ь д о р ф М.В., Т и й г и м я г и Э.А., Т р е у ф е л ь д т Ю.Э. Вопросы прогнозирования нагрузок узлов электроэнергетической системы. См. наст. сб., с. 83...86.

J. Valtin, M. Meldorf

#### Bus-Load Simulation Program

#### S u m m a r y

A program for the analysis and forecasting of the bus-load and reactive bus-load is described. The lead time of the forecast lies in the interval from one hour to one year. The program is realized in FORTRAN for computer M-222.

УДК 621.315.620

А.Я. Аннус, О.И. Гроссман,  
Т.Л. Метусала, Р.А. Ойдрам,  
О.О. Таупере

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАГРЯЗНЕННЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ШЖБ-ГОС

Проблема загрязнения высоковольтных изоляторов становится в связи с развитием промышленности и сельского хозяйства все более ощутимой. Загрязнение штыревых линейных изоляторов 10 кВ не представляло до последнего времени особого интереса. Однако в связи с развитием механизации сельскохозяйственных работ, особенно с интенсивным применением удобрений и ядохимикатов, возникает необходимость определения грязеразрядных характеристик также для изоляторов 10 кВ.

Как установлено в [1], электрическая прочность загрязненных и увлажненных изоляторов достаточно точно связана со средней удельной поверхностной проводимостью слоя загрязнения  $\bar{\omega}_n$ . Удельная проводимость зависит от многих факторов и в условиях естественного загрязнения меняется в широких пределах. В условиях слабого загрязнения  $\bar{\omega}_n$  может находиться в пределах от десятых долей до 2...4 мкСм. Вблизи источников сильного загрязнения, таких как химические предприятия, тепловые электростанции (особенно работающие на горючих сланцах), поверхностная проводимость изоляторов может принимать значительные величины —  $\bar{\omega}_n = 60$  мкСм и даже больше.

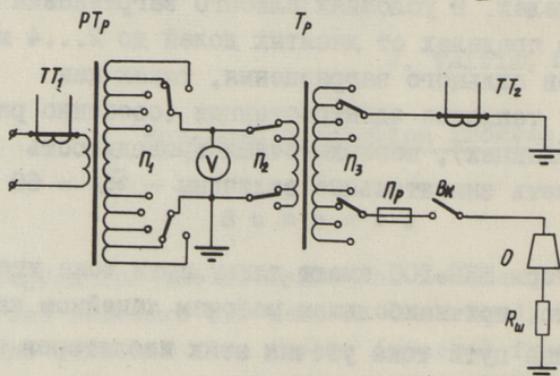
Изоляторы ШЖБ-ГОС имеют длину пути тока утечки 33 см. Следовательно, при наибольшем рабочем линейном напряжении удельная длина пути тока утечки этих изоляторов составляет 2,87 см/кВ и согласно [2] они могут применяться в районах со второй степенью загрязнения атмосферы,

Исходя из сказанного, в работе определялись разрядные характеристики сильно загрязненных изоляторов с удельной поверхностной проводимостью в пределах от 6 до 95 мкСм. Испытания проводились с изоляторами ШЖБ-ЮС производства комбината "Ярваканди Техасед". При проведении этих испытаний основывались на ГОСТ 10390-71 [3].

Из регламентируемых стандартом методов в настоящей работе был использован метод предварительного загрязнения. Этот метод был выбран в связи с относительной простотой постановки опытов и с возможностью оценки минимальной электрической прочности изоляторов в заданных условиях загрязнения твердым веществом [1].

При определении разрядных напряжений загрязненных изоляторов был использован способ приложения напряжения толчком (способ ПТ). Выбор способа ПТ позволял получить независимо от напряжения достаточно малое внутреннее сопротивление испытательной установки при его сравнительно небольшой мощности. Для этого плавный регулятор приложенного напряжения был заменен ступенчатым.

Испытательная установка. Принципиальная схема испытательной установки показана на фиг. 1. Высоковольтный трансформатор  $T_p$  выполнен на номинальную мощность 150 кВА. Высоковольтная обмотка трансформатора имеет 8 выводов, которые позволяют использовать трансформатор на 4 номинальные напряжения вторичной обмотки - 7,5; 15; 30 и 60 кВ. Первичная обмотка имеет номинальное напряжение 660 В, дополнительные выводы позволяют изменять его на  $\pm 2,5\%$ . Регулиро-



Фиг. 1. Принципиальная схема испытательной установки.

вочный трансформатор РТр выполнен с 10 выводами вторичной обмотки. Номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора 380 В.

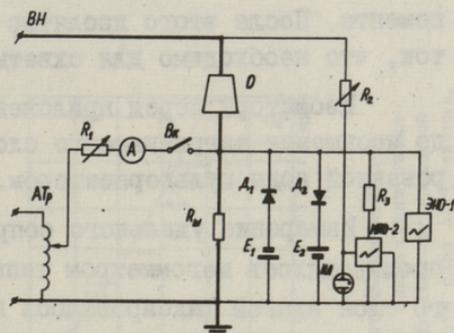
Благодаря выбранной схеме установка позволяет получить напряжение в пределах примерно от 5 до 60 кВ. Шаг регулировки напряжения при низших значениях около 100 В, при более высоких напряжениях примерно 1000 В.

Расчетные токи короткого замыкания установки на всех ступенях напряжения не ниже 20 А. Расчетное падение напряжения на внутреннем сопротивлении установки при токах утечки по изолятору 100 мА не превышает 1 %, что вполне соответствует требованиям ГОСТ 10390-71.

Защита установки от длительного протекания токов короткого замыкания осуществляется плавким предохранителем Пр, а также токовой защитой с помощью трансформаторов тока, включенных в цепь питания и во вторичную обмотку высоковольтного трансформатора Тр.

Для приложения напряжения на изолятор толчком применяется выключатель Вк. Для измерения токов утечки применяется шунт  $R_{ш} = 5 \dots 10 \text{ Ом}$ .

Измерение токов утечки и наблюдение за формой приложенного напряжения осуществляется с помощью схемы, показанной на фиг. 2.



Фиг. 2. Схема измерения тока утечки.

В этой схеме для записи тока утечки и приложенного напряжения применяется шлейфовый осциллограф МПО-2. Для постоянного наблюдения за током утечки дополнительно применяется электронный осциллограф ЭНО-1.

Градуировка схемы измерения тока производится с помощью источника тока, состоящего из автотрансформатора АТр, реостата  $R_1$ , амперметра и выключателя Вк.

Защита шлейфа осциллографа МПО-2 от сверхтоков при перекрытии изолятора выполнена с помощью схемы, состоящей из диодов  $D_1$  и  $D_2$  и аккумуляторов  $E_1$  и  $E_2$ .

Схема записи приложенного напряжения состоит из шлейфа и предварительного сопротивления  $R_2$ , выполненного из резисторов КЭВ-40 10 МОм. Защита от попадания высокого напряжения в осциллограф при замене шлейфа осуществлена неоновой лампочкой НЛ. Испытуемый изолятор помещается в камере из оргстекла размерами 1,5x1,5x1,5 м и устанавливается на макете траверсы. Для предотвращения разрушения слоя загрязнения при установке изолятора в камеру на его головку перед загрязнением устанавливается гибкий провод, имитирующий вязку провода.

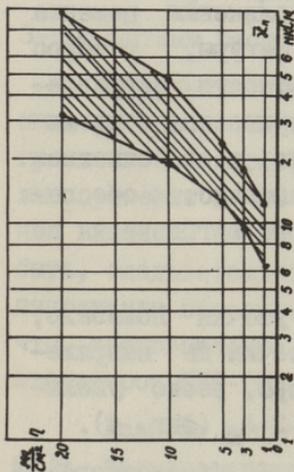
Методика эксперимента и обработка данных. Изоляторы загрязнялись вручную цементом марки 400. На чистую увлажненную поверхность изолятора с помощью мелкого сита по возможности равномерно наносилось определенное количество цемента. После этого изолятор выдерживался в течение суток, что необходимо для схватывания цемента.

Изоляторы перед приложением напряжения увлажнялись до насыщения загрязняющего слоя путем распыления дистиллированной воды пульверизатором.

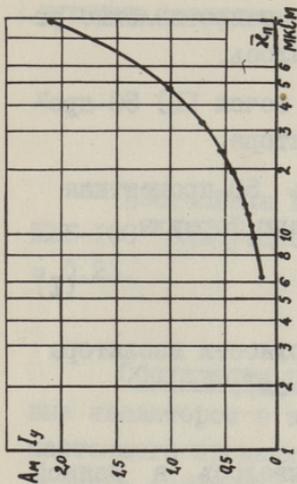
Измерение удельного сопротивления загрязняющего слоя производилось мегомметром типа МС-05. Насыщение загрязняющего слоя влагой фиксировалось по мегомметру: когда сопротивление изолятора при постепенном увлажнении стабилизировалось, то считалось, что слой увлажнен до насыщения.

Включение напряжения на изолятор толчком производилось выключателем на стороне высокого напряжения. Опыт продолжался либо до высыхания поверхности изолятора, либо до его перекрытия. Максимальная длительность опыта не превышала трех минут: за это время поверхность изолятора подсохла настолько, что перекрытие в дальнейшем оказалось невозможным. Большинство перекрытий происходило в течение первой минуты испытания.

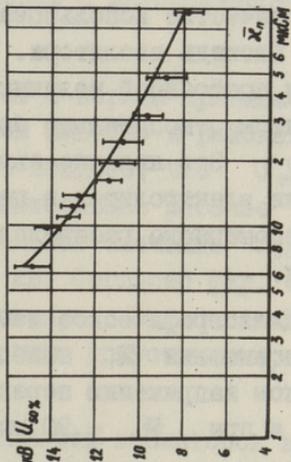
Один изолятор испытывался повторно 6...8 раз после восстановления насыщенного состояния увлажнения. При таком



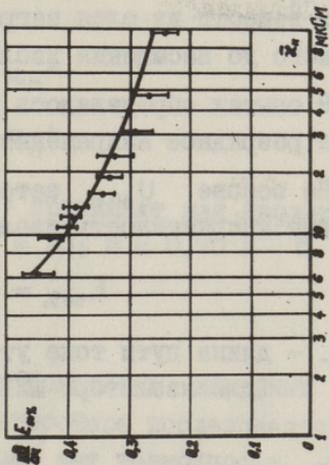
Фиг. 3. Зависимость между удельной проводимостью  $\bar{\xi}_n$  и средней поверхностной плотностью загрязнения  $\eta$ .



Фиг. 4. Зависимость наибольших токов утечки перед перекрытием от удельной проводимости слоя загрязнения.



Фиг. 5. Зависимость 50-процентного разрядного напряжения изоляторов ШЖБ-10С от удельной проводимости слоя загрязнения.



Фиг. 6. Зависимость 50-процентной разрядной напряженности изоляторов ШЖБ-10С от удельной проводимости слоя загрязнения.

количестве повторных испытаний исключалось вымывание растворимых веществ из слоя загрязнения, т.е. сопротивление увлажненного до насыщения изолятора не менялось.

В опытах определялось методом двух точек [1] 50-процентное разрядное напряжение  $U_{50\%}$  изолятора.

На основе  $U_{50\%}$  затем вычислялась 50-процентная разрядная напряженность изолятора с помощью формулы

$$E_{50\%} = \frac{U_{50\%}}{L}, \quad (1)$$

где  $L$  - длина пути тока утечки по поверхности изолятора (для изолятора ШЖБ-ИОС  $L = 33$  см).

Результаты опытов. Как выше указывалось, в данной работе определялись грязеразрядные характеристики изоляторов ШЖБ-ИОС в интервале удельной поверхностной проводимости от 6 до 95 мкСм. Для этого интервала была определена зависимость между  $\bar{\epsilon}_n$  и средней поверхностной плотностью загрязнения  $\eta$  в увлажненном до насыщения состоянии поверхности изолятора (фиг. 3). Средняя поверхностная плотность загрязнения  $\eta$  определялась в этих опытах делением общего количества использованного для загрязнения цемента на общую площадь изолятора. Как видно из фигуры, разброс  $\bar{\epsilon}_n$  при постоянной величине средней плотности загрязнения цементом относительно большой и увеличивается с увеличением  $\eta$ . Это явление связано, очевидно, непостоянством содержания электролитов в цементе и невозможностью обеспечения равномерного распределения цементного загрязнения по изолятору.

Осциллографическое измерение токов утечки показало, что при повышении  $\bar{\epsilon}_n$  наибольшие токи утечки на напряжении, равном напряжению перекрытия изолятора, резко увеличиваются и при  $\bar{\epsilon}_n = 90$  мкСм достигают  $2 A_M$  (фиг. 4).

На фиг. 5 представлена зависимость 50-процентного разрядного напряжения от  $\bar{\epsilon}_n$ . На этой фигуре приведены также доверительные интервалы  $U_{50\%}$  при надежности 0,95, найденные методом точного построения доверительных интервалов.

На фиг. 6 представлена зависимость 50-процентной разрядной напряженности от удельной поверхностной проводимости  $\bar{\epsilon}_n$ .

Полученные характеристики хорошо аппроксимируются следующими зависимостями:

$$U_{50\%} = A \bar{x}_n^{-a} \quad (2)$$

и

$$E_{50\%} = B \bar{x}_n^{-b}.$$

Постоянные в формулах (2) принимают для изоляторов ШЖБ-ИОС следующие величины:  $A = 23$ ;  $B = 0,70$  и  $a = b = 0,23$ .

Обсуждение результатов. Поведение линейных штыревых изоляторов в загрязненной атмосфере исследовалось до настоящего времени слабо. Поэтому нет возможности всестороннего сравнения характеристик загрязненных изоляторов ШЖБ-ИОС с характеристиками других изоляторов подобной конструкции. Лишь в [4] приводятся грязеразрядные напряжения фарфоровых изоляторов ШЖБ-ИО. Из этих данных следует, что при покрытии изоляторов изоляционной глазурью их разрядное напряжение при удельном поверхностном сопротивлении  $\rho_s = 2 \dots 4$  кОм ( $\bar{x}_n = 250 \dots 500$  мксм) составляет примерно 7 кВ. Этот опыт проводился при увлажнении с интенсивностью  $10 \frac{\text{мм}}{\text{час}}$  3-процентным раствором NaCl.

Полученные данные позволяют в первом приближении оценить работоспособность изоляторов ШЖБ-ИОС в районах с загрязненной атмосферой. Так, в [5] найдено, что  $U_{50\%}$  должно примерно на 20 % превышать наибольшее рабочее напряжение линии. В нашем случае минимальное значение  $U_{50\%}$  должно быть, следовательно, не ниже 14 кВ. Согласно фиг. 4 такое напряжение перекрытия достигается при  $\bar{x}_n$  около 10 мксм, что, следовательно, является верхним допустимым пределом для изоляторов ШЖБ-ИОС.

Если не допускать загрязненности изоляторов выше 10 мксм, надежность изоляции линии 10 кВ при рабочем напряжении должна быть сравнительно высокой, так как в нормальном режиме напряжение фаз относительно земли не превышает 7 кВ. Однако определение надежности изоляции линии 10 кВ в районах с загрязненной атмосферой в настоящее время не представляется возможной, поскольку отсутствуют статистические дан-

ные об однофазных замыканиях на землю и вероятности совпадения однофазных замыканий с наилучшими погодными условиями на линиях.

## Л и т е р а т у р а

1. Александров Г.Н. и др. Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции. Л., "Энергия", 1969, 240 с.

2. Руководящие указания по проектированию и эксплуатации линии электропередачи и распределительных устройств переменного тока 3-500 кВ в районах с загрязненной атмосферой. - "Электрические станции", 1966, № 7, с 91...96.

3. ГОСТ 10390-71. Электрооборудование высокого напряжения. Методы испытаний электрической прочности внешней изоляции в условиях загрязнения.

4. Левшунов Р.Т. Грязеразрядные напряжения и тепловая устойчивость изоляторов с полупроводящей глазурью. - "Электричество", 1969, № 10, с. 82...84.

5. Александров Г.Н., Кизеветтер В.Е. Развитие разряда вдоль проводящей поверхности высоковольтной изоляции в электрических сетях. - "Известия вузов. Энергетика", 1962, № 5, с. 20...27.

A. Annus, O. Grossman,  
T. Metusala, R. Oidram,  
O. Tapupere

### The Flashover Characteristics of Polluted Insulators ШЖБ-ИОС

#### S u m m a r y

The flashover voltages of polluted pin-type glass insulators ШЖБ-ИОС are given here. The insulators were polluted with cement (saturated humidity), changing surface conductivity from 6 to 95  $\mu\text{S}$ .

УДК 621.315.623.7

А.Я. Аннус

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЛЬТСЕКУНДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПЕРЕКРЫТИЯ И ПРОБОЯ ШТЫРЕВЫХ СТЕКЛЯННЫХ  
ИЗОЛЯТОРОВ 6 И 10 кВ

Воздействующие на изоляцию воздушных линий (ВЛ) 6 и 10 кВ грозовые перенапряжения имеют разнообразную форму, т.е. их амплитуда, крутизна фронта и длительность могут изменяться в широких пределах. В то же время защита таких ВЛ от прямых ударов молний практически неосуществима. В этих условиях наиболее полное представление о надежности изоляции ВЛ дают сравнения вольтсекундных характеристик перекрытия и пробоя изоляторов, определенных в широких пределах изменения времени воздействия импульсного напряжения.

В отечественной литературе единственные сведения о вольтсекундных характеристиках перекрытия линейных фарфоровых изоляторов классов напряжения 6 и 10 кВ приведены в [1]. Для стеклянных изоляторов такие характеристики отсутствуют.

В доступной литературе также не имеется данных по экспериментальному определению вольтсекундных характеристик пробоя изоляторов 6 и 10 кВ.

Однако известен ряд работ по испытанию в основном фарфоровых изоляторов в воздухе с импульсами с очень крутыми фронтами ( $10^3 \dots 10^4$  кВ/мкс) [2,3,4,5]. В ходе этих испытаний некоторые фарфоровые изоляторы пробивались, но стеклянных изоляторов пробить не удалось.

Основная трудность при определении вольтсекундных характеристик пробоя заключается в выборе окружающей среды для предотвращения перекрытия изолятора. Это связано с тем, что одновременно с предотвращением перекрытия среда из-за

наличия краевых разрядов в ней влияет также на процесс пробоя.

Целью работы явилось определение следующих вольтсекундных характеристик стеклянных штыревых изоляторов: а) перекрытия в воздухе; б) пробоя в трансформаторном масле с добавкой дистиллированной воды согласно ГОСТ 20510-75; в) перекрытия (или пробоя) в элегазе.

Испытывались стеклянные штыревые изоляторы типов ШЖБ-10С, ШН-10 и ШН-6, выпускаемые комбинатом "Ярваканди Техасед" в ЭССР.

Испытательная установка. Источником напряжения использовался генератор импульсных напряжений с максимальной амплитудой напряжения 800 кВ и ударной емкостью 12500 пФ. При испытаниях использовались аperiodические импульсы в пределах от 1,0/50 до 50/200 мкс.

Амплитудное значение импульсного напряжения выбиралось достаточным, чтобы большинство разрядов происходило на фронте или в крайнем случае на максимуме импульса.

Измерения разрядного напряжения и предразрядного времени производилось емкостным делителем напряжения и осциллографами типа ОК-17М и С8-2. При использовании осциллографа ОК-17М все разряды фотографировались. Осциллограф С8-2 снабжен органом памяти и допускает непосредственный замер величины разрядного напряжения и предразрядного времени на экране.

Испытания и измерение напряжения производились согласно ГОСТ 1516-73 и 17512-72.

Для обработки результатов разрядные напряжения группировались по предразрядным временам. Принимая, что результаты испытаний распределяются согласно нормальному закону, для каждой группы вычисляли среднюю величину напряжения разряда  $U_{ср}$ , его доверительный интервал при надежности 0,95 а также среднеквадратичное отклонение  $\sigma$ .

Вольтсекундная характеристика строилась через доверительные интервалы средних значений напряжения разря-

Т а б л и ц а I

## Результаты испытания изоляторов

Тип изолятора	ШЖБ-ЮС		ШН-Ю		ШН-6	
	+	-	+	-	+	-

## I. Испытания на перекрытие

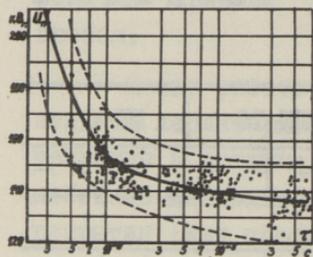
Количество испытанных изоляторов, шт	15	5	5	5	5	5
Общее количество поданных импульсов, шт.	362	179	137	128	118	106
Среднее среднеквадратичное отклонение, %	4,0	4,0	4,0	4,5	4,0	6,3
Вольтсекундная характеристика приведена на фиг.	1а	1б	2а	2б	3а	3б

## 2. Испытания на пробой в масле

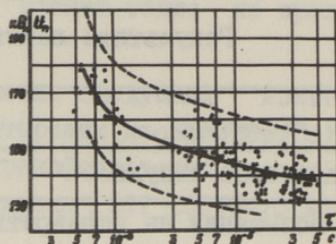
Количество испытанных изоляторов, шт	82	60	24	25	22	40
Среднее среднеквадратичное отклонение, %	12	10	10	10	10	10
Вольтсекундная характеристика приведена на фиг.	4а	4б	5а	5б	6а	6б

## 3. Испытания в элегазе

Количество испытанных изоляторов, шт	64	93	143	32	-	-
Из них пробиты, шт	-	4	3	19	-	-
Среднее среднеквадратичное отклонение напряжения перекрытия, %	8,0	6,0	7,1	-	-	-
Вольтсекундная характеристика приведена на фиг.	7а	7б	8а	8б	-	-

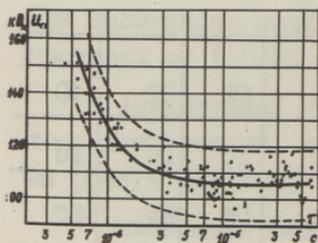


а)

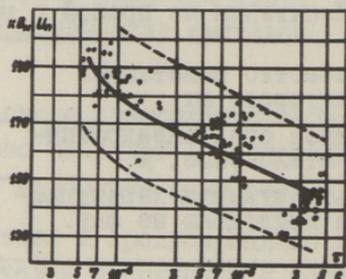


б)

Фиг. 1. Вольтсекундная характеристика перекрытия изолятора ШЖБ-10С в воздухе: а) положительный импульс, б) отрицательный импульс.

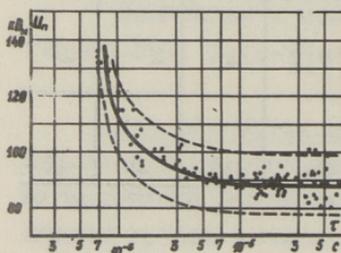


а)

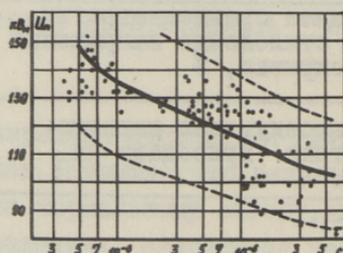


б)

Фиг. 2. Вольтсекундная характеристика перекрытия изолятора ШН-10 в воздухе: а) положительный импульс, б) отрицательный импульс.



а)



б)

Фиг. 3. Вольтсекундная характеристика перекрытия изолятора ШН-6 в воздухе: а) положительный импульс, б) отрицательный импульс.

да. Кроме того, с обеих сторон вольтсекундных характеристик рисовались предельные характеристики  $U_{cp} \pm 3\sigma_{cp}$ , где  $\sigma_{cp}$  оценивалось как средняя величина среднеквадратичных отклонений по группам.

Исследование перекрытий изоляторов. Изоляторы типа ШЖБ-ИОС устанавливались на основании, имитирующем траверсу, а к шейке изолятора связывалась имитация линейного провода согласно ГОСТ 1232-67.

Изоляторы типа ШН были установлены на ровной металлической и заземленной поверхности.

На каждый изолятор подавалось 20...25 импульсов. Определялись разрядное напряжение и предразрядное время.

Основные данные и результаты обработки экспериментов приведены в таблице I и на фиг. I...3.

Исследование пробоя изоляторов в трансформаторном масле. Определение пробивного напряжения проводилось у 253 изоляторов во влажном трансформаторном масле с добавкой воды 0,4...0,5 % согласно ГОСТ 20510-75. На каждый изолятор подавался один импульс.

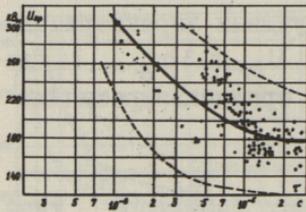
Основные данные и результаты обработки экспериментов приведены в таблице I и на фиг. 4...6.

Проверка запаса пробивного напряжения в элегазе. Испытания изоляторов проводились в герметичной камере из бумажно-бакелитового цилиндра, заполненного элегазом при давлении 2 атм.

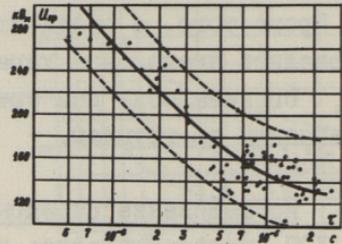
На каждый изолятор подавался один импульс.

Основные данные и результаты обработки экспериментов приведены в таблице I и на фиг. 7...8.

Обсуждение результатов. Характеристики перекрытия. Изолятор ШЖБ-ИОС. Вольтсекундные характеристики при положительных и отрицательных импульсах практически совпадают. Объясняется это симметрическим электрическим полем изолятора, полученным при моделировании изолятора в электролитической ванне.

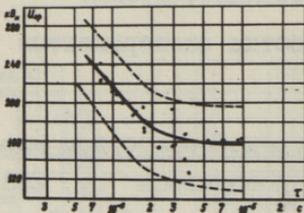


а)

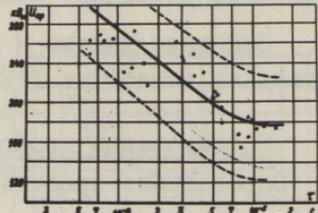


б)

Фиг. 4. Вольтсекундная характеристика пробоя изолятора ШЖБ-10С в трансформаторном масле: а) положительный импульс, б) отрицательный импульс.

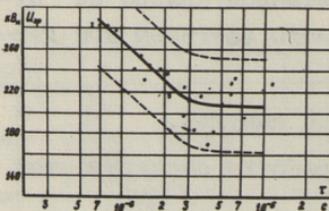


а)

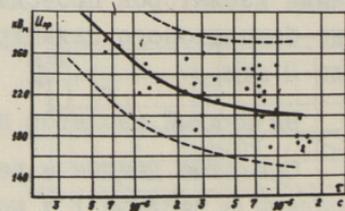


б)

Фиг. 5. Вольтсекундная характеристика пробоя изолятора ШН-10 в трансформаторном масле: а) положительный импульс, б) отрицательный импульс.

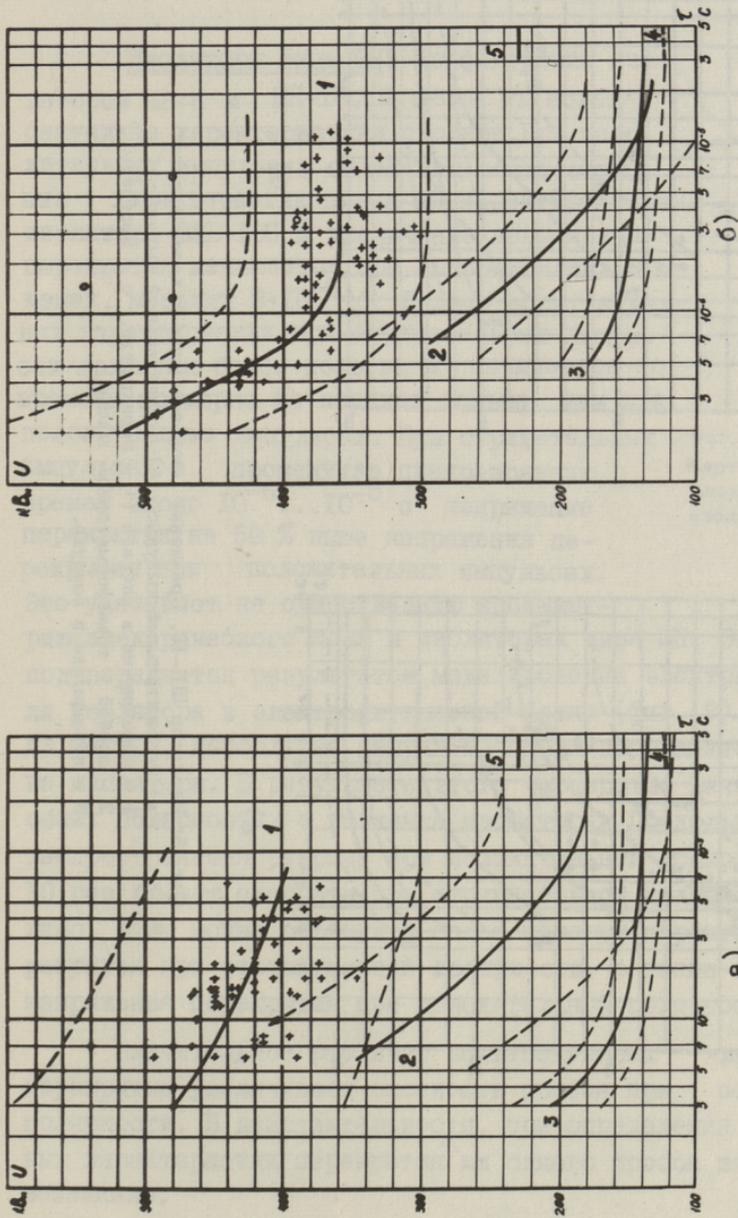


а)



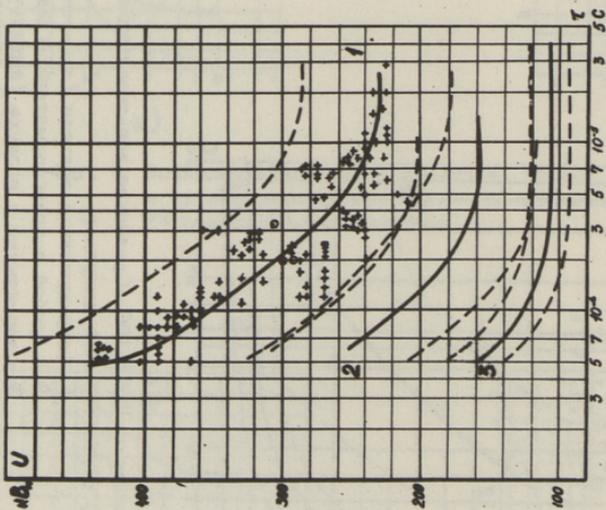
б)

Фиг. 6. Вольтсекундная характеристика пробоя изолятора ШН-6 в трансформаторном масле: а) положительный импульс, б) отрицательный импульс.

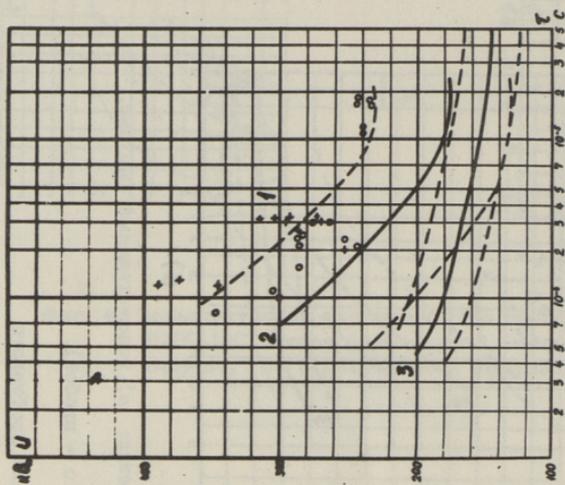


Фиг. 7. Изолятор ШЖБ-10С. Сравнение вольтсекундных характеристик: а) положительный импульс, б) отрицательный импульс:

- 1 - перекрытие в элегазе (+ - перекрытие, о - пробой),
- 2 - пробой в трансформаторном масле,
- 3 - перекрытие в воздухе (амплитудное значение пробивного напряжения при 50 Гц),
- 4 - в сухом, 5 - во влажном трансформаторном масле.



а)



б)

Фиг. 8. Изолятор ШН-10. Сравнение вольтсекундных характеристик:  
 а) положительный импульс, б) отрицательный импульс,  
 1 - перекрытие в эл.газе (+ - перекрытие, o - пробой),  
 2 - пробой в трансформаторном масле,  
 3 - перекрытие в воздухе.

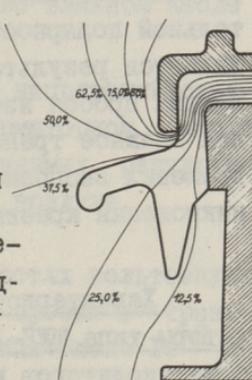
Явное увеличение напряжения перекрытия начинается при предразрядных временах, меньших  $10^{-6}$  с.

Изоляторы типа ШН. Конфигурация изоляторов ШН-6 и ШН-10, а также их вольтсекундные характеристики сходны. При положительных импульсах общий вид вольтсекундных характеристик похож на характеристики изолятора ШЖБ-10С и увеличение напряжения перекрытия начинается при предразрядных временах, меньших  $3 \cdot 10^{-6}$  с. Подъем вольтсекундных характеристик при отрицательных импульсах является более пологим и начинается со времени примерно на порядок больше, чем при положительных импульсах. При отрицательных импульсах в промежутке предразрядных времен около  $10^{-6} \dots 10^{-5}$  с напряжение перекрытия на 50 % выше напряжения перекрытия при положительных импульсах.

Это указывает на существенную несимметрию электрического поля в изоляторах типа ШН. Этот вывод подтверждается результатом моделирования электрического поля изолятора в электролитической ванне (фиг. 9). Как видно из фигуры, наибольшие напряжения поля наблюдаются у колпачка изолятора. В результате этого перекрытие начинается при обеих полярностях с колпачка изолятора. Поскольку скорость распространения разряда при положительной полярности около 10 раз больше скорости при отрицательной полярности, то видимо, этим можно объяснить более пологую характеристику перекрытия при отрицательной полярности, а также более низкие напряжения перекрытия при положительной полярности.

Значительное различие вольтсекундных характеристик перекрытия увеличивает опасность пробоя при положительной полярности. В действительности, при определении вольтсекундных характеристик перекрытия ни одного пробоя изоляторов не возникало.

Характеристики пробоя в трансформаторном масле. Вид вольтсекундных характеристик всех изоляторов одинаковый и весьма сходный с вольтсекундными характеристиками пробоя трансформаторного масле [6, 7]. Такое сходство наблюдалось и в [8].



Фиг. 9.  
Картина распределения электрического поля изолятора ШН-10.

Повышение напряжения пробоя изоляторов ШЖБ-ИОС и ШН-10 при отрицательной полярности наблюдается уже при предразрядных временах  $10^{-5}$  с, а изоляторов ШН-10 при положительной полярности - при  $(2...5) \cdot 10^{-6}$  с. Это, вероятно, является результатом запаздывания краевых разрядов, вызывающих пробой изоляторов в трансформаторном масле. Применяя влажное трансформаторное масло, частицы влаги при временах экспозиции менее  $10^{-4}$  с мало сказываются на возникновении краевых разрядов.

Характеристики перекрытия (пробоя) в элегазе. Изоляторы типа ШЖБ-ИОС. При положительной полярности пробить изоляторов не удалось. Подъем вольсекундных характеристик перекрытия пологий и начинается при предразрядных временах  $10^{-5}$  с, а сама характеристика находится выше, чем при отрицательной полярности.

При отрицательной полярности из 93 испытанных изоляторов пробивались 4. Крутой подъем вольсекундных характеристик перекрытия начинается при предразрядном времени около  $10^{-6}$  с.

Изоляторы типа ШН. При положительной полярности из 143 изоляторов удалось пробить только 3. Подъем вольсекундных характеристик перекрытия плавно увеличивается с уменьшением предразрядных времен начиная с  $10^{-5}$  с.

При отрицательной полярности из 31 испытанного изолятора пробивалось 19.

Сравнение вольсекундных характеристик. Изоляторы ШЖБ-ИОС. При отрицательных импульсах вольсекундные характеристики перекрытия в воздухе и пробоя в трансформаторном масле при предразрядных временах около 10 мкс пересекаются, а при положительной полярности приближаются настолько, что вместо перекрытия часто должен настать пробой (фиг. 7). Фактически при определении характеристики перекрытия в воздухе ни один изолятор не пробился.

На фиг. 7 также приведены амплитудные значения пробивного напряжения при промышленной частоте в сухом и во влажном трансформаторном масле. При этом видно, что вольт-

секундная характеристика плавно приближается к значениям пробивного напряжения в сухом трансформаторном масле, а значение пробивного напряжения при 50 Гц во влажном масле находится намного выше.

Следовательно, определение пробивных напряжений стеклянных изоляторов при импульсах в трансформаторном масле с добавкой воды (или без нее) не дает сравнимых результатов для оценки пробиваемости изоляторов в воздухе.

Изоляторы типа ШН. При обеих полярностях вольтсекундные характеристики перекрытия в воздухе и пробоя в трансформаторном масле при предразрядных временах около  $10^{-5}$  с приближаются (фиг. 8).

При положительной полярности изоляторы в элегазе выдержали без пробоя напряжение, в среднем в 2...2,5 раза превышающее напряжение перекрытия в воздухе. При отрицательной полярности 19 изоляторов из 32 пробивались.

Пробой изолятора из-за высокой концентрации электрического поля преимущественно начинается от внутреннего электрода. В результате этого, при подаче отрицательного импульса на колпачок изолятора, внутренний электрод имеет положительную полярность и процесс пробоя развивается в более благоприятных условиях.

Заключение. При перенапряжениях, а также при лабораторных испытаниях перекрытию и пробоям изолятора предшествуют частичные разряды вокруг электродов, изменяя распределение электрического поля изолятора.

В воздухе частичные разряды образуют у электродов как бы полупроводящий слой, сглаживая неоднородность распределения электрического поля в изоляторе.

В жидкой среде диаметры каналов частичных разрядов на один или даже несколько порядков меньше, а энергоемкость разрядов значительно больше, чем в воздухе. Соприкасаясь с поверхностью стекла, каналы частичных разрядов обуславливают там локальное (в некотором объеме стекла) повышение напряженности электрического поля. Места концентрации электрического поля являются очагами для начала пробоя.

Все среды, окружающие изолятор, одновременно влияют количественно и качественно на характер и параметры час-

тичных разрядов у электродов и изменяют в широких пределах напряжение начала пробоя, а в результате этого также величину пробивного напряжения.

### Л и т е р а т у р а

1. Кожухов В.К. Импульсные характеристики изоляторов. - "Труды ВЭИ. Изоляторы", 1941, вып. 55, с.42...84.
2. L a n t z, A.D. Measuring the lightning strenght of high-voltage insulators. - "Power Apparatus and Systems", 1960, no.48, pp. 298...303.
3. R o z z o l i, G.R. Insulator testing using steep-front voltage surges. - "Transaction of the South African Institute of Electrical Engineers", 1961, 52, no.3, pp.71...73.
4. N a n t s c h e v, N., W a l t s c h e v, M. Iso-lationsvermögen von Freileitungsisolatoren bei Impulsspannungen. - "Elektrie", 1973, Nr.7, S. 382...383.
5. Хо С. и др. Меры по предотвращению повреждений высоковольтных фарфоровых изоляторов на распределительных линиях. - "Дэнки кедо кэнкю", 1971, т. 27, № 3, с.1...101. Перевод с японского языка № Ц-8889, Всесоюзный центр переводов научно-технической литературы и документации Государственного Комитета СМ СССР по науке и технике и Академии Наук СССР, М., 1974.
6. Техника высоких напряжений. Под. ред. М.В. Кос-тенко. М., "Высшая школа", 1973, 528 с.
7. Каляцкий И.И., Кривенко В.В. Исследование импульсной электрической прочности трансформаторного масла и воды при повышенных давлениях и температурах. - В сб.: Пробой диэлектриков и полупроводников. М.-Л., "Энергия", 1964, с. 249...251.
8. Воробьев А.А. и др. Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород. Томск, Изд.-во Томского Университета, 1971, 225 с.

The 6 and 10 kV Pin-Type Glass Insulators  
Flashover and Breakdown Volt-Second Charac-  
teristics

S u m m a r y

The following volt-second characteristics of glass pin insulators for 6 and 10 kV (made in "Järvakandi Tehased") are given as follows:

- 1) flashover volt-second characteristics in air and in SF<sub>6</sub>;
- 2) breakdown volt-second characteristics in transformer oil with moisture.



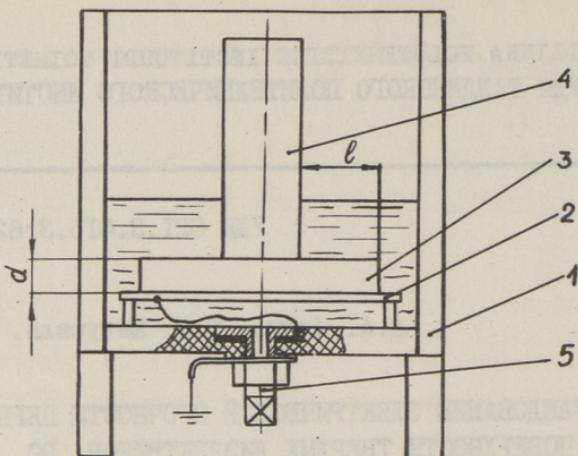
УДК 621.3.015.3:621.314.213.3

А.А. Иллус, Т.Л. Метусала, В.М. Спирка

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПЕРЕКРЫТИЯ  
ПО ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ВО ФТОР-  
СОДЕРЖАЩИХ ЖИДКОСТЯХ

Разработка изоляции высоковольтных электрических устройств с испарительным охлаждением возможна только при всестороннем исследовании изоляционных характеристик элементов изоляции. Вопросы пробивной электрической прочности фторсодержащих жидкостей исследованы как при напряжении промышленной частоты [1, 2], так и при импульсных напряжениях [3]. Поскольку электрическая прочность перекрытия по поверхности твердых диэлектриков во фторсодержащих жидкостях недостаточно исследована, то в настоящей статье приведены результаты таких исследований.

Объекты исследования. Напряжения перекрытия  $U_{пер}$  определялись для образцов, расположенных между цилиндрическим электродом и плоскостью и помещенных во фторсодержащую жидкость. Эскиз испытательного сосуда с образцом и электродами показан на фиг. 1. Испытательный сосуд (1) изготовлен из органического стекла, что позволило визуально следить за развитием разряда по поверхности образца (3). Плоский электрод (2) имеет квадратную форму и изготовлен из нержавеющей стали. Цилиндрический электрод (4) изготовлен из латуни диаметром 40 мм с закругленными краями (радиус 0,6 мм), что соответствует радиусу закругления прямоугольного обмоточного провода по ГОСТ 434-53. Таким образом, в испытуемом образце создается электрическое поле, приблизительно соответствующее полю в элементах изоляционной конструкции в об-



Фиг. 1. Эскиз сосуда для определения напряжения перекрытия по поверхности твердых диэлектриков: 1 - сосуд, 2 - основание - плоский электрод, 3 - испытуемый образец, 4 - цилиндрический электрод, 5 - втулка для слива жидкости и заземления электрода.

ласти края обмотки трансформатора с испарительным охлаждением.

Исследованию подвергались твердые диэлектрики в следующих жидкостях: 1) электрокартон во фреоне-IIЗ; 2) стеклотекстолит марки СТЭФ во фторсодержащей жидкости БЛ-II.

Названные материалы выбраны с учетом того, что они применяются в реальных изоляционных конструкциях электротехнических устройств с испарительным охлаждением (электрокартон во фреоне находит применение в преобразовательных установках с силовыми полупроводниковыми приборами, а стеклотекстолит во фторсодержащей жидкости БЛ-II - в трансформаторах специального назначения). Некоторые основные показатели для используемых фторсодержащих жидкостей приведены в таблице, а более подробные данные приведены в [1, 2].

Т а б л и ц а

Показатель	Фреон-IIЗ	Жидкость БЛ-II
Температура кипения при атмосферном давлении, °С	47,6	160-190
Диэлектрическая проницаемость $\epsilon/\epsilon_0$ при 50 Гц	2,5	2,1
Электрическая прочность в стандартном разряднике, кВ/см	125	180

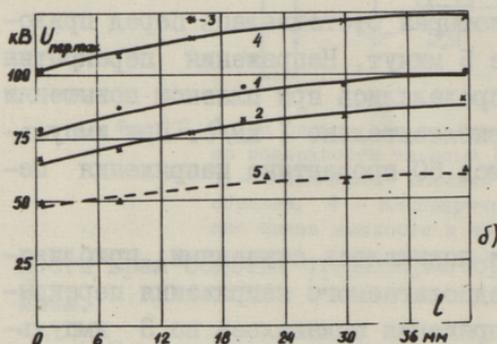
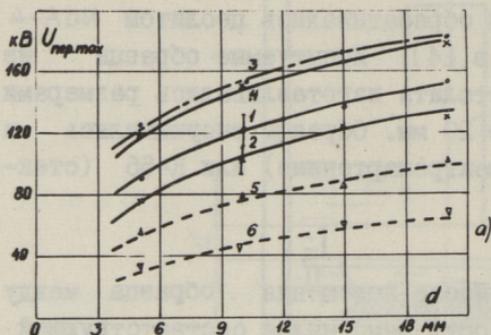
Используемые жидкости обрабатывались цеолитом NaA-4 по технологии, приведенной в [4]. Испытуемые образцы из электрокартона и стеклотекстолита изготавливались размерами 120x120 мм толщиной от 5 до 20 мм. Образцы высушивались и покрывались лаком ГФ-95 (электрокартонные) или К-55 (стеклотекстолитовые).

Методика испытания. После помещения образца между электродами испытательный сосуд заполнялся соответствующей фторсодержащей жидкостью, которая отстаивалась перед приложением напряжения в течение 5 минут. Напряжения перекрытия при промышленной частоте определялись при плавном повышении напряжения со скоростью приблизительно 1 кВ/с. При импульсных напряжениях определялись 50-процентные напряжения перекрытия  $U_{\text{пер.50\%}}$ .

Импульсное напряжение повышалось ступенями, приблизительно равными 3-5 % от предполагаемого напряжения перекрытия. На каждой ступени напряжения подавалось по 3 импульса. Импульсное напряжение на образце регистрировалось катодным осциллографом типа ОК-17М при помощи емкостного делителя напряжения. При испытаниях определялись напряжения перекрытия для образцов с различной толщиной при неизменной величине длины уступа  $l = 15$  мм и для образцов с различной длиной уступа при неизменной толщине  $d = 10$  мм.

Результаты исследования. Зависимости напряжения перекрытия по поверхности стеклотекстолита в жидкости БЛ-II от толщины образца и от длины уступа при разных воздействующих напряжениях приведены на фиг. 2. Экспериментальные точки на этих кривых соответствуют средним значениям напряжений перекрытия 10...15 образцов. Для полученных средних значений определялись по [5] среднеквадратичное отклонение  $S$  и доверительные интервалы с надежностью 0,95.

Из приведенных зависимостей видно, что  $U_{\text{пер.50\%}}$  при стандартных импульсах отрицательной полярности на цилиндрическом электроде приблизительно в 1,15 раза выше, чем  $U_{\text{пер.0,5}}$  при импульсах положительной полярности. Поскольку доверительные интервалы  $U_{\text{пер.50\%}}$  (см. фиг. 2, а) частично перекрываются, то разницу между  $U_{\text{пер.50\%}}$  при



Фиг. 2.

Зависимость напряжения перекрытия по поверхности стеклотекстолита СТЭФ в жидкости БЛ-П между цилиндрическим электродом и плоскостью от толщины образца  $d$  при  $l = 15$  мм (а) и от длины уступа образца  $l$  при  $d = 5$  мм (б):

- 1 -  $-1,5/40$  мкс,
- 2 -  $+1,5/40$  мкс,
- 3 -  $+50/250$  мкс,
- 4 - оба электрода цилиндрические, импульс  $1,5/40$  мкс,
- 5 - при 50 Гц,
- 6 - напряжение начальных частотных разрядов при 50 Гц.

положительной и отрицательной полярностях импульсов можно считать несущественной.

При изменении толщины образца в 4 раза (от 5 до 20 мм) при неизменной длине уступа образца  $l = 15$  мм  $U_{пер,0,5}$  увеличивается при положительной полярности стандартных импульсов в 1,8 раза - от 75 до 134 кВ. Коэффициент импульса при этих же условиях равняется в среднем 1,35. При стандартных импульсах отрицательной полярности коэффициент импульса равен в среднем 1,6.

Изменение длины уступа  $l$  изменяет  $U_{пер}$  незначительно. Напряжение перекрытия значительно зависит от емкости канала разряда, которая пропорциональна удельной поверхностной емкости. Это видно также из формулы Теплера, связывающей длину скользящих разрядов  $l_{ск}$  с удельной поверхностной емкостью  $C_{уд}$ , с приложенным напряжением  $U$  и с крутизной приложенного напряжения  $A$ :

$$l_{ск} = k C_{уд}^2 U^5 A^{0,25}, \quad (I)$$

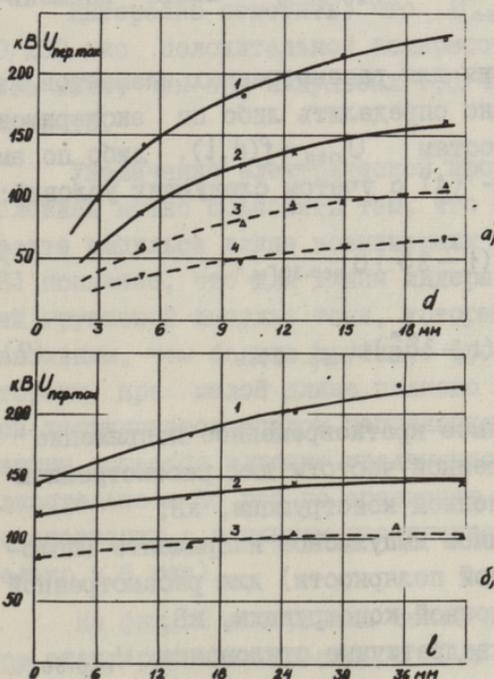
где  $k$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от полярности напряжения.

Полученные в настоящей работе зависимости  $U_{\text{пер}} = f(d, l)$  для образцов из стеклотекстолита в жидкости БД-П хорошо коррелируются следующими эмпирическими зависимостями:

$$U_{\text{пер.50 Гц}} = 16 d^{0,4} l^{0,4}, \quad (2)$$

$$U_{\text{пер.50 \%}} = 32 d^{0,4} l^{0,4}, \quad (3)$$

где  $U_{\text{пер.50 Гц}}$  — напряжение перекрытия при напряжении промышленной частоты (действующее значение), кВ.



Фиг. 3.

Зависимости напряжения перекрытия по поверхности электрокартона во фреоне-113 между цилиндрическим электродом и плоскостью от толщины образца  $d$  при  $l = 15$  мм (а) и от длины уступа  $l$  при  $d = 10$  мм (б):  
 1 — при импульсе  $-1,5/40$  мкс,  
 2 —  $+1,5/40$  мкс,  
 3 — при 50 Гц,  
 4 — напряжение начальных частичных разрядов при 50 Гц.

По приведенным формулам (2) и (3) можно рассчитать  $U_{\text{пер}}$  для элементов изоляции из стеклотекстолита толщиной от 5 до 20 мм и длиной уступа от 0 до 40 мм.

Зависимости  $U_{\text{пер}} = f(d, l)$  для электрокартона во фреоне-113 приведены на фиг. 3. Из приведенных кривых также

видно, что  $U_{\text{пер.50\%}}$  при стандартных импульсах отрицательной полярности приблизительно в 1,5 раза больше, чем при импульсах положительной полярности. Соответствующие коэффициенты импульсов равны 2,3 и 1,5.

Экспериментально полученные зависимости  $U_{\text{пер}} = f(d, l)$  для электрокартона хорошо коррелируются следующими эмпирическими зависимостями:

$$U_{\text{пер.50Гц}} = 17 d^{0,4} l^{0,1}, \quad (4)$$

$$U_{\text{пер.50\%}} = 37 d^{0,4} l^{0,1}. \quad (5)$$

Формула (5) выведена здесь также для импульсов положительной полярности, при которых  $U_{\text{пер.50\%}}$  имеют наименьшую величину.

Допустимые напряжения для рассмотренных элементов изоляционных конструкций можно определить либо по экспериментально полученным зависимостям  $U_{\text{пер}} = f(d, l)$ , либо по эмпирическим формулам (1) — (4) с учетом следующих условий:

$$U_{\text{доп.50Гц}} = (1 - 3S^*) U_{\text{пер.50Гц}}, \quad (6)$$

$$U_{\text{доп.и}} = (1 - 3S_u^*) U_{\text{пер.50\%}}, \quad (7)$$

где  $U_{\text{доп.50Гц}}$  — допустимое кратковременное напряжение промышленной частоты для рассмотренной изоляционной конструкции, кВ;  
 $U_{\text{доп.и}}$  — допустимое импульсное напряжение (положительной полярности) для рассмотренной изоляционной конструкции, кВ;  
 $S^*$ ;  $S_u^*$  — среднеквадратичные отклонения  $U_{\text{пер.50Гц}}$  и  $U_{\text{пер.50\%}}$  соответственно, относ.един.; по результатам испытания определено, что  $S^* \approx S_u^* \approx 0,11$ .

Сравнение  $U_{\text{пер}}$  по поверхности стеклотекстолита в жидкости БМ-П и электрокартона во фреоне-113 показывает, что в последнем случае  $U_{\text{пер}}$  значительно выше. Например, при  $d = 10$  мм и  $l = 15$  мм напряжение перекрытия по электрокар-

тону во фреоне-IIЗ при отрицательных импульсах примерно в 1,5 раза, а при положительных импульсах и при напряжении промышленной частоты около 1,2 раза выше, чем при перекрытии стеклотекстолита в жидкости БЛ-П. Это можно объяснить тем, что диэлектрические проницаемости фреона-IIЗ ( $\epsilon/\epsilon_0 \approx 2,5$ ) и электрокартона ( $\epsilon/\epsilon_0 = 4...6$ ) более близки между собой, чем стеклотекстолита СТЭФ ( $\epsilon/\epsilon_0 = 5...7$ ) и фторсо-держающей жидкости БЛ-П ( $\epsilon/\epsilon_0 \approx 2,1$ ). Вследствие этого у образцов из электрокартона во фреоне-IIЗ распределение электрического поля в твердом диэлектрике и в клине жидкости между электродом и образцом более равномерно, чем во втором случае. Кроме того, для стеклотекстолитовых образцов удельная поверхностная емкость больше, что в соответствии с формулой (1) увеличивает длину скользящих разрядов.

Интересно отметить, что  $U_{пер.0,5}$  при импульсах 50/250 мкс положительной полярности приблизительно в 1,4 раза выше, чем при импульсах 1,5/40 мкс положительной полярности.

Увеличение электрической прочности перекрытия в таких условиях можно объяснить тем, что с уменьшением крутизны фронта импульса длина возникающих лидеров уменьшается. В [6] показано, что для длины лидера определяющим является первый групповой импульс тока, который получается тем более интенсивным, чем больше крутизна фронта импульса. С другой стороны, при малой длине полного импульса прорастание лидеров затрудняется спадом напряжения. В данном случае преобладающим остается влияние увеличения длины фронта импульса (приблизительно в 30 раз по сравнению со стандартным импульсом) по сравнению с влиянием увеличения длины импульса (приблизительно в 6 раз).

На фиг. 2 изображена также зависимость  $U_{пер.50\%}$  при стандартных импульсах от  $d$  и  $l$  для стеклотекстолитовых образцов, расположенных между двумя цилиндрическими электродами. В этом случае  $U_{пер.50\%}$  приблизительно в 1,2 раза выше, чем  $U_{пер.50\%}$  для образца между плоскостью и цилиндрическим электродом отрицательной полярности.

Допустимые напряжения для рассмотренных элементов изоляционных конструкций при длительно действующих рабочих напряжениях определяются на основании результатов измерения

напряжения начальных частичных разрядов  $U_{нач}$  и его среднеквадратичного отклонения. Зависимость  $U_{нач} = f(d)$  приведена на фиг. 2, а по результатам исследования [2], а среднеквадратичное отклонение  $S_{нач}^* \approx 0,14$ . Допустимое рабочее напряжение получается по формуле, аналогичной (6).

Выводы: I. Исследования напряжения перекрытия показали, что  $U_{пер}$  по электрокартону во фреоне-IIЗ при напряжении промышленной частоты и при стандартных импульсах положительной полярности приблизительно в 1,2 раза выше, чем  $U_{пер}$  по стеклотекстолиту (марка СТЭФ) в жидкости БЛ-II.

2. Коэффициент импульса для напряжений перекрытия по электрокартону во фреоне-IIЗ при стандартных импульсах отрицательной полярности приблизительно равен 2,3, а при положительной полярности - 1,5. Те же показатели для стеклотекстолита в жидкости БЛ-II равны 1,6 и 1,35 соответственно.

#### Л и т е р а т у р а

I. М е т у с а л а Т.Л., М е р е с м а а Р.Р.  
С п и р к а В.М. Исследование изоляции трансформаторов с испарительным охлаждением. - "Электротехн. пром-сть. Сер. Электрические материалы", 1972, вып. 4 [21] с. 5...6.

2. М е т у с а л а Т.Л. Исследование электрических характеристик изоляции трансформаторов с испарительным охлаждением. Кандидатская диссертация ЛПИ. Л., 1970.

3. С п и р к а В.М. Об импульсной прочности фторсодержащих жидкостей. - "Сборник научно-технических статей НИПТИ", М., "Энергия", 1971, вып. 13, с. 160...168.

4. П а ю с т е О.И., С п и р к а В.М. Исследование электрической прочности фторсодержащих жидкостей в зависимости от их очистки и сушки. - "Сборник научно-технических статей НИПТИ", Таллин, 1971, вып. 15, с. 270...276.

5. Г м у р м а н В.Е. Введение в теорию вероятностей и математическую статистику. М., "Высшая школа", 1966.

6. Н а u s c h i l d W. Gleitentladungen an Isolieranordnungen unter Transformatorölen bei Impulsspannungen. - "Wiss. Z. Elektrotechn.", 1971, Bd, 17, H.2/3, 177...198.

A. Illus, T. Metusala,  
V. Spirka

Flashover Strength of Solid Dielectrics in Freons

S u m m a r y

The data of impulse and 50 Hz flashover strength of presspahn and glass-tekstolite in liquids Freon 113 and БМ-II are given in this paper.

## С о д е р ж а н и е

I.	М.Э. Кээл. О корректировании планов активной мощности электроэнергетических систем в вероятностно-определенных условиях. . . . .	3
2.	М.Х. Валдма, Д.К. Вийлуп, М.Э. Кээл, К.Ю. Мёллер, Х.Э.-Й. Таммоя. Программа оптимизации режима и расчета вход-выход характеристик тепловой электростанции с учетом случайных колебаний параметров режима. . . . .	II
3.	М.Х. Валдма, Л.К. Вийлуп, К.Ю. Мёллер, Х.Э.-Й. Таммоя. Об оценивании вход-выход характеристик агрегатов тепловой электростанции. . . . .	I7
4.	М.Х. Валдма, Х.Э.-Й. Таммоя. Методика оптимизации распределения нагрузок между агрегатами и расчета вход-выход характеристик тепловой электростанции. . . . .	29
5.	Х.Э. Лелумеэс. Программа расчета плановых характеристик энергообъектов в вероятностно-определенных условиях. . . . .	45
6.	Х.Э.-Й. Таммоя. Некоторые результаты статистического анализа параметров режима тепловых электростанций. . . . .	49
7.	М.В. Мельдорф. Математическая модель нагрузки энергетической системы. . . . .	57
8.	Ю.Э. Треуфельдт. К вопросу определения узловых нагрузок в электроэнергетических системах. . . . .	67
9.	Ю.Ю. Вальтин, М.В. Мельдорф, П.Х. Разсаар, Э.А. Тийгимяги, Ю.Э. Треуфельдт. О математическом моделировании нагрузок узлов энергетической системы. . . . .	7I
IO.	Ю.Ю. Вальтин, М.В. Мельдорф, Э.А. Тийгимяги, Ю.Э. Треуфельдт. Вопросы прогнозирования нагрузок узлов энергетической системы. . . . .	8I
II.	Ю.Ю. Вальтин, М.В. Мельдорф. Программа анализа и прогноза нагрузок узлов энергетической системы. . . . .	85

I2.	А.Я. Аннус, О.И. Гроссман, Т.Л. Метусала, Р.А. Ойдрам, О.О. Таупере. Исследование раз- рядных характеристик загрязненных изоляторов ШЖБ-ЮС. . . . .	89
I3.	А.Я. Аннус. Определение вольтсекундных харак- теристик перекрытия и пробоя штыревых стек- лянных изоляторов 6 и 10 кВ. . . . .	97
I4.	А.А. Иллус, Т.Л. Метусала, В.М. Спирка. Ис- следование электрической прочности перекры- тия по поверхности твердых диэлектриков во фторсодержащих жидкостях. . . . .	III

© ТПИ, Таллин, 1976

Таллинский политехнический институт. Труды ТПИ № 403.  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. Сборник статей У1.  
Редактор К. Мёллер. Технический редактор Л. Лоопер.  
Сборник утвержден коллегией Трудов ТПИ 26 мая 1976 года.  
Подписано к печати 20 октября 1976 года. Бумага 60x90/16.  
Печ. л. 7,75 + 0,5 прилож. Уч.-изд. л. 7,15. Тираж 300.  
МВ-07345. Ротапринт ТПИ, Таллин, ул. Коскла, 2/9. Зак. № 1183.  
Цена 72 коп.







Цена 72 коп.