

11-149  
АКАДЕМИЯ НАУК СССР

КАРЕЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ

40

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

11-140  
А К А Д Е М И Я   Н А У К   С С С Р  
КАРЕЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ

---

*Выпуск 40*

*Труды*

*1964*

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
МОСКВА — ЛЕНИНГРАД

1964



А 224

Ответственный редактор

*Н. Г. Зайцев*

п 44308

Центральная научная  
БИБЛИОТЕКА  
Академии наук Киргизской ССР

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В сборник включены работы, выполненные Отделом энергетики и автоматики Карельского филиала АН СССР, посвященные в основном автоматизации оптимального распределения активных нагрузок в энергосистемах.

Несмотря на большие успехи, достигнутые в решении этой проблемы как советскими, так и зарубежными учеными и инженерами, окончательно решенной ее еще считать нельзя. В частности, не получило достаточно удовлетворительного решения определение экономических характеристик тепловых электростанций. В статьях сборника описываются схемы аналоговых вычислительных устройств, предназначенных для расчетов таких характеристик.

Мало изучены до настоящего времени также вопросы оптимальной точности автоматических устройств для автоматического управления энергосистемами. Одна из статей сборника посвящена этому вопросу.

Рассматривается также применение цифровой вычислительной машины для расчетов режимов энергосистемы.



## МОДЕЛИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПРИРОСТОВ РАСХОДА ТОПЛИВА<sup>1</sup> ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Н. Г. ЗАЙЦЕВ

Для наивыгоднейшего распределения активных нагрузок между параллельно работающими электростанциями необходимо знать характеристики относительных приростов этих электростанций. Как известно [1], такая характеристика представляет собой зависимость относительного прироста  $b$  электростанции от ее мощности  $P$ , т. е.

$$b = f(P). \quad (1)$$

Относительным же приростом тепловой электростанции называется изменение расхода топлива  $B$  при изменении мощности ее на единицу. Таким образом, относительный прирост численно равен первой производной расхода топлива по мощности

$$b = \frac{dB}{dP}. \quad (2)$$

Расход топлива может быть выражен в денежных единицах или в единицах условного топлива — это не меняет сути последующих рассуждений.

<sup>1</sup> В дальнейшем вместо термина «относительный прирост расхода топлива» для краткости употребляется выражение «относительный прирост».



Рассматриваемая характеристика зависит как от состава работающего оборудования, так и от характеристик относительных приростов отдельных агрегатов. Оба эти фактора вследствие изменения условий эксплуатации не остаются постоянными, что и вынуждает непрерывно определять характеристику относительных приростов электростанции. Укажем, что рассчитать заранее все возможные характеристики невозможно; применение же только наиболее типичных из них приводит к существенным погрешностям. Избежать их можно лишь при непосредственном определении характеристики в соответствии с конкретными условиями эксплуатации. Такое определение — трудоемкая операция, для успешного выполнения которой необходимо применение средств вычислительной техники.

Для этой цели могут быть использованы как моделирующие, так и специальные цифровые вычислительные устройства. Оба типа устройств обладают определенными достоинствами и недостатками. Судить о том, какому типу при решении рассматриваемой задачи следует отдать предпочтение, можно лишь после их разработки и соответствующего опыта эксплуатации. В качестве первого шага в этом направлении нами разработано описываемое ниже моделирующее устройство.

Укажем, что попытки создать автоматическое устройство для непосредственного замера относительного прироста электростанции в целом — приростомер [2], — на наш взгляд, обречены на неудачу. Во-первых, замерить приращение расхода топлива, особенно на электростанциях, работающих на твердом топливе, очень трудно, если вообще возможно. Во-вторых, таким способом принципиально можно определить относительный прирост только за прошедший отрезок времени и лишь для одного значения мощности. Для наиболее выгодного же распределения нагрузок необходимо заранее знать всю характеристику относительных приростов.

Таким образом, рассматриваемую характеристику следует получать расчетным путем, учитывая при этом состав работающего оборудования и характеристики относительных приростов отдельных агрегатов. При этом необходимо учитывать изменение последних в процессе эксплуатации.

## Расчетные формулы и порядок расчета характеристики относительных приростов

Особые трудности при построении рассматриваемой характеристики возникают на тепловых электростанциях с общим паропроводом. В этом случае характеристика относительных приростов электростанции строится на основе характеристик относительных приростов отдельных турбоагрегатов и котлов в следующем порядке [1]. Задав произвольной величиной мощности электростанции  $P$ , распределяют ее между работающими турбоагрегатами наиболее выгодным образом. При этом для каждого агрегата должно выполняться равенство

$$q_i = \frac{dQ_i}{dP_i} = q, \quad (3)$$

где  $q_i$  — относительный прирост тепла  $i$ -того турбогенератора;  $Q_i$  — расход тепла  $i$ -тым турбогенератором;  $P_i$  — мощность  $i$ -того турбогенератора;  $q = \frac{dQ}{dP}$  — относительный прирост машинного зала.

Ясно, что, кроме равенства (3), должно соблюдаться также и равенство

$$P = \sum_{i=1}^m P_i, \quad (4)$$

где  $m$  — число работающих турбоагрегатов.

После этого по расходным характеристикам турбоагрегатов

$$Q_i = F(P_i) \quad (5)$$

и величине расхода тепла на прочие нужды  $Q_{пр.}$  (теплофикация, отпуск тепла с острым паром, расход тепла на промышленных блок-станциях и т. п.) определяется общий расход тепла электростанцией  $Q$ ,

$$Q = \sum_{i=1}^m Q_i + Q_{пр.} \quad (6)$$

Полученный расход тепла наиболее выгодным образом распределяется между работающими котлами. При этом соблюдаются следующие равенства:

$$Q = \sum_{j=1}^n Q_{к. j} \quad (7)$$



$$b_{к. j} = \frac{dB_j}{dQ_{к. j}} = b_{к.}, \quad (8)$$

где  $n$  — число работающих котлов;  $b_{к. j}$  — относительный прирост расхода топлива на выработку тепла  $j$ -тым котлом;  $b_{к.}$  — относительный прирост котельной.

Относительный прирост электростанции в целом при данной величине мощности определяется произведением

$$b = \frac{b_{к. g}}{1 - k_{с. н.}}, \quad (9)$$

где величина  $1 - k_{с. н.}$  учитывает расход мощности на собственные нужды. Для давней электростанции ее можно считать постоянной и вычислить заранее.

Произведя расчеты по приведенной схеме для различных значений мощности, получим всю характеристику относительных приростов электростанции.

Рассмотрим, каким образом следует учитывать изменение характеристик отдельных агрегатов при изменении условий эксплуатации.

Характеристики котлов существенно меняются при изменении их состояния (зашлаковка, присосы воздуха и т. д.) и качества топлива. Эти же изменения одновременно влияют и на максимальную производительность котлов. Поэтому с достаточной точностью [1] влияние названных факторов можно учесть, уменьшая в характеристике относительных приростов производительность котла пропорционально уменьшению его максимальной производительности. Математически это можно записать следующим образом:

$$Q_{к. д. j} = Q_{к. п. j} k_{с.} k_{т.} = \varphi(b_{к. j}) k_{с.} k_{т.}, \quad (10)$$

где  $Q_{к. д. j}$  — производительность котла при данных условиях эксплуатации;  $Q_{к. п. j}$  — производительность котла, имевшая место при величине  $b_{к. j}$  во время испытаний;  $k_{с.}$ ,  $k_{т.}$  — коэффициенты, характеризующие изменение максимальной производительности котла вследствие изменения его состояния и качества топлива.

Величина коэффициентов  $k_{с.}$  и  $k_{т.}$  определяется персоналом на основе опыта эксплуатации котла, анализа его состояния и качества топлива.

Характеристики турбоагрегатов зависят от температуры охлаждающей воды и (для турбоагрегатов с отбором пара) от величины отбора пара. Влияние температуры охлаждающей воды на характеристики относительных приростов турбоагрегатов можно не учитывать. Во-первых, оно очень мало [1]; во-вторых, влияние температуры охлаждающей воды на турбоагрегаты всех электростанций энергосистемы примерно одинаково, что влечет за собой одинаковое изменение и характеристик относительных приростов электростанций в целом, а такое изменение при наимыгоднейшем распределении нагрузок можно не учитывать. Изменение расходных характеристик турбоагрегатов, обусловленное изменением температуры охлаждающей воды, можно учесть с достаточной степенью точности, умножая расходную характеристику турбоагрегата (5), полученную для определенного значения температуры охлаждающей воды, на коэффициент  $K_{в.}$ , меняющийся с изменением этой температуры:

$$Q_{д. i} = k_{в.} Q_i = k_{в.} F(P_i). \quad (11)$$

Зависимость  $k_{в.}$  от температуры охлаждающей воды может быть определена заблаговременно.

Влияние величины отбора пара  $Q_{отб.}$  на характеристику относительных приростов турбоагрегата сказывается в том, что в зависимости от  $Q_{отб.}$  изменяется значение мощности  $P_{изл.}$ , при котором происходит излом характеристики, т. е.

$$P_{изл.} = \psi(Q_{отб.}). \quad (12)$$

Величина относительных приростов на горизонтальных участках характеристики остается при этом практически без изменения. Величину отбора пара, влияющую на расход тепла машинным залом, можно учесть вместе с  $Q_{пр.}$  (6). Поэтому расходная характеристика строится для значения  $Q_{отб.} = 0$  и считается не зависящей от величины отбора.

Совокупность выражений (1)–(12) совместно с условиями ограничения минимальной и максимальной нагрузок отдельных агрегатов позволяет получить характеристику относительных приростов тепловой электростанции с высокой степенью точности.



Учитывая, что выполнение операции умножения переменных величин в электронных моделирующих устройствах связано с определенными трудностями, выражение (9) целесообразно преобразовать следующим образом:

$$\ln b = \ln b_{к.} + \ln q - \ln(1 - k_{с.п.}) \quad (13)$$

Раскладывая величину  $\ln(1 - k_{с.п.})$  в ряд Тейлора и ограничиваясь первым членом разложения, поскольку значение  $k_{с.п.}$  не превышает 0.05—0.07, получаем окончательно

$$\ln b = \ln b_{к.} + \ln q + k_{с.п.} \quad (14)$$

Такое преобразование тем более целесообразно, что для наиболее удобного распределения активных нагрузок удобнее иметь как раз величину  $\ln b$ , а не  $b$  [3]. Соответственно в характеристиках относительных приростов отдельных агрегатов вместо величин относительных приростов следует использовать их логарифмы. Например, выражение (10) должно принять вид

$$Q_{к. j} = \Phi(\ln b_{к. j}) k_{с.} k_{т.} \quad (15)$$

Никаких трудностей это не вызывает.

### Структурная схема и производство расчета моделирующим устройством

На рис. 1 представлена структурная схема электронного моделирующего устройства, рассчитывающего характеристику относительных приростов тепловой электростанции с учетом всех приведенных выше выражений и условий. Расчет производится следующим образом.

Блоком  $P$  задается мощность электростанции. Для выполнения этой операции может быть использован обыкновенный потенциометр, с движка которого снимается напряжение, соответствующее задаваемой мощности. Величина его контролируется вольтметром, подключенным непосредственно к движку потенциометра.

Заданная мощность поступает в блок  $\Delta P$ , в котором она сравнивается с суммой мощностей, вырабатываемых турбоагрегатами. Выполнение этой операции, а также операции интегрирования и воспроизведения нелиней-

ных зависимостей достаточно подробно рассмотрено в литературе [4] и в описании не нуждается. Полученная разность подается в блок  $\ln q$ , который определяет логарифм относительного прироста машинного зала.

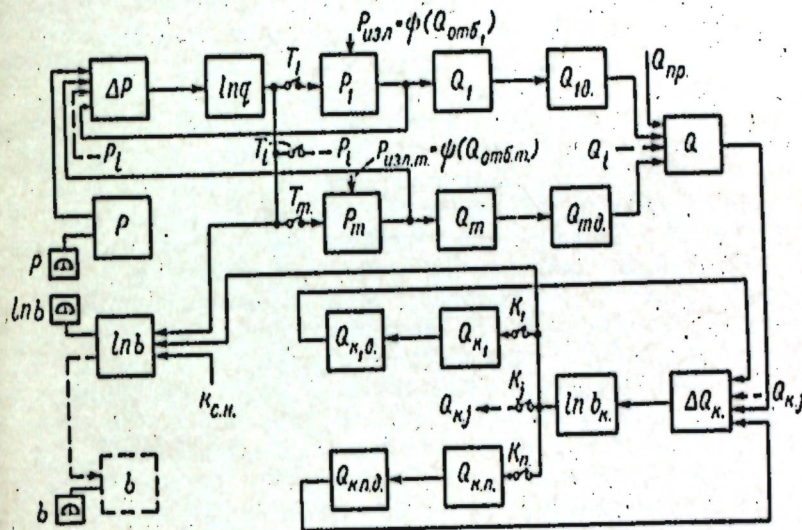


Рис. 1. Структурная схема моделирующего устройства.

Определение  $\ln q$  производится интегрирующим блоком по уравнению

$$\ln q = \ln q_{пред.} + k_q \int_0^t \Delta P dt, \quad (16)$$

где  $\ln q_{пред.}$  — значение  $\ln q$ , имевшее место в предыдущий момент времени;  $k_q$  — постоянный коэффициент пропорциональности;  $\Delta P = P - \sum_{i=1}^m P_i$  — разность между мощностью электростанции и суммой мощностей отдельных турбоагрегатов.

Уравнение (16) показывает, что если мощность станции больше (меньше), чем сумма мощностей отдельных агрегатов, то величина  $\ln q$  растет (уменьшается) до тех пор, пока баланс мощности (4) не будет соблюдаться,



что и необходимо. Постоянную времени интегратора следует выбирать малой (доли секунды), чтобы процесс определения величины  $\ln q$  проходил достаточно быстро.

В соответствии с полученной величиной  $\ln q$  блоками  $P_i$  определяются мощности отдельных турбоагрегатов. Учет мощностей только работающих агрегатов осуществляется выключателями  $T_i$ , которыми блоки, соответствующие неработающим агрегатам, отключаются. Поскольку на все блоки подается одна и та же величина  $\ln q$ , то этим самым достигается выполнение условий (3). Блоки  $P_i$  представляют функциональные преобразователи, выражающие нелинейные зависимости  $P_i = \Phi(\ln q_i)$ , представленные в соответствии с [1] на рис. 2, а (пунктир). Для учета ограничения минимальной и максимальной мощностей эти зависимости следует представить в виде, показанном там же сплошной линией. Схема, реализующая эту зависимость, приведена на рис. 2, б. Хотя по условиям работы схемы участки характеристики и не могут быть строго вертикальными, но наклон, требуемый для работы схемы, настолько мал, что его не следует принимать во внимание. Для турбоагрегатов с отбором пара должно соблюдаться еще и условие (12). Кроме того, минимальная и максимальная мощности также зависят от величины отбора. Поэтому величины  $P_{\min i}$ ,  $P_{\text{изл.} i}$  и  $P_{\max i}$  должны устанавливаться оператором в зависимости от величины  $Q_{\text{отб.}}$ . Поскольку с достаточной степенью точности можно считать, что  $P_{\text{изл.} i} - P_{\min i} = \text{const}$  и  $P_{\max i} - P_{\text{изл.} i} = \text{const}$ , то достаточно менять лишь величину  $P_{\min i}$ . При этом характеристика смещается по вертикали параллельно самой себе и величины  $P_{\text{изл.} i}$  и  $P_{\max i}$  устанавливаются автоматически.

Вычисленные значения  $P_i$  поступают в блок  $\Delta P$  (рис. 1) и в блок  $Q_i$ , определяющий расход тепла этим турбоагрегатом в соответствии с его расходной характеристикой (5). В блоке  $Q_{\text{д.} i}$  расход тепла корректируется в зависимости от температуры охлаждающей воды, при этом значение коэффициентов  $k_{\text{в.}}$  должно быть установлено оператором.

Полный расход тепла машинным залом (б) вычисляет блок  $Q$ . Полученную величину распределяют между работающими котлами блоки  $\Delta Q_{\text{к.} j}$ ,  $\ln b_{\text{к.} j}$ ,  $Q_{\text{к.} j}$ ,  $Q_{\text{к.д.} j}$ . Этот процесс полностью аналогичен процессу распре-

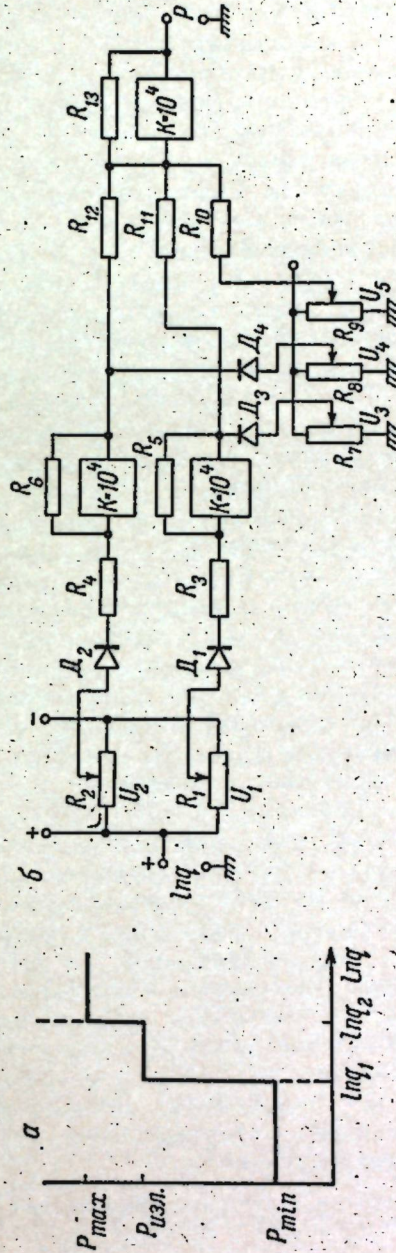


Рис. 2. Схема для воспроизведения зависимости  $P = \Phi(\ln q)$ .

а — график функции  $P = \Phi(\ln q)$ ; б — функциональный преобразователь для воспроизведения этой функции. Обозначения и данные схемы:  $U_1 = \ln q$ ;  $U_2 = \ln q$ ;  $U_3 = P_{\max} - P_{\text{изл.}}$ ;  $U_4 = P_{\text{изл.}}$ ;  $U_5 = P_{\min}$ ;  $R_1 = 1.5 \text{ ком}$ ;  $R_2 = R_3 = R_4 = 2 \text{ ком}$ ;  $R_5 = R_6 = 2.2 \text{ ком}$ ;  $R_7 = R_8 = R_9 = R_{10} = R_{11} = R_{12} = R_{13} = 200 \text{ ком}$ .



деления мощности между агрегатами машинного зала. При этом  $\Delta Q_{к.}$  соответствует  $\Delta P$ ,  $\ln b_{к.} - \ln q$ ,  $K_j - T_i$ ,  $Q_{к.д. j} - Q_{д. i}$  и блок, соответствующий  $Q_i$ , отсутствует, так как расход топлива котельной не определяется.

Вычисленные значения  $\ln q$  и  $\ln b_{к.}$  поступают в блок  $\ln b$ . Туда же вводится величина  $k_{с.п.}$ , устанавливаемая оператором. После их суммирования на выходе блока  $\ln b$  получается значение  $\ln b$ , величину которого можно определить по измерительному прибору. В случаях, когда требуется определить относительный прирост, а не логарифм его, следует предусмотреть блок перевода  $\ln b$  в  $b$ , что и указано пунктиром. Таким образом, задав на входе устройства величину  $P$ , мы на выходе его практически сразу же получаем величину  $\ln b$  (или  $b$ ) с учетом всех условий, которые необходимо при этом иметь в виду. Меняя величину  $P$  от 0 до  $P_{\max}$ , получаем всю характеристику относительных приростов. Функции оператора сводятся к установке исходных условий ( $Q_{отб.}$ ,  $k_{в.}$ ,  $Q_{пр.}$ ,  $k_{с.}$ ,  $k_{т.}$ ,  $k_{с.п.}$ ) и положения выключателей  $T_i$ ,  $K_i$ , изменению величины  $P$  и записи величины  $\ln b$ .

Для экспериментальной проверки теоретических соображений, изложенных выше, и выявления реальной возможности создания моделирующего устройства, пригодного для практических расчетов, была собрана схема моделирующего устройства для одного из возможных типов тепловой электростанции. В качестве примера рассматривалась<sup>1</sup> тепловая электростанция среднего давления с двумя турбинами (АК-25-1 ЛМЗ и АТ-25-1 ЛМЗ) и тремя котлами (два котла производительностью 110 т/час и один — 75 т/час). Характеристики оборудования были приняты по литературным данным. Моделирующее устройство было выполнено в полном соответствии с приведенной структурной схемой и изложенными положениями. Проведенные испытания показали, что создание таких устройств для расчета характеристик относительных приростов тепловых электростанций безусловно целесообразно, так как с их помощью можно без всякого труда и с большой степенью точности получать рассматриваемые характеристики для любых условий работы электростанции.

<sup>1</sup> В обсуждении вопроса о составе оборудования тепловой электростанции принимал участие инженер А. А. Макаров.

## Возможности применения описанного устройства

Предлагаемое устройство может быть использовано на диспетчерском пункте энергосистемы для задания характеристик относительных приростов тепловых электростанций при расчетах наиболее выгодного распределения активных нагрузок энергосистемы. Состав работающего основного оборудования электростанций всегда известен диспетчеру системы, а установку коэффициентов, характеризующих условия работы электростанций, часто изменять не требуется, во всяком случае они могут оставаться постоянными в течение нескольких суток. Так что диспетчеру необходимо узнать у персонала электростанций лишь величину отбора пара, что можно сделать по телефону.

Наличие на диспетчерском пункте таких устройств в сочетании с вычислительным устройством для расчетов наиболее выгоднейшего распределения активных нагрузок между отдельными электростанциями позволит диспетчеру системы оперативно и с большой степенью точности определять требуемые при данной нагрузке системы мощности отдельных электростанций.

Еще большее применение рассматриваемое устройство найдет на самой электростанции, где оно позволит дежурному персоналу определять наиболее выгодное распределение нагрузок между работающими агрегатами. В этом случае оно может быть использовано и непосредственно для автоматического управления нагрузками отдельных агрегатов.

Достаточно задать мощность станции, и на каждый работающий агрегат от устройства может быть передана величина нагрузки, с которой должен работать этот агрегат. Необходимо лишь предусмотреть автоматические устройства, осуществляющие воздействие на регуляторы агрегатов, если их действительная нагрузка не равна задаваемой.

## Выводы

1. Характеристика относительных приростов тепловой электростанции меняется в зависимости от состава работающего оборудования и характеристик отдельных агрегатов. Эти факторы изменяются практически не-



прерывно, что вынуждает непрерывно определять и рассматриваемую характеристику.

2. Выполнить эту задачу можно лишь с помощью вычислительной техники. В данном случае с успехом могут быть использованы электронные моделирующие устройства.

3. Расчет характеристики относительных приростов тепловой электростанции с учетом влияния изменения условий эксплуатации с высокой степенью точности можно производить, используя выражения (1)—(12) при условии ограничения минимальной и максимальной нагрузок отдельных агрегатов.

4. Расчет может быть произведен моделирующим устройством, структурная схема которого приведена на рис. 1.

5. Предлагаемое устройство применимо как для расчета характеристики относительных приростов тепловой электростанции, так и для распределения нагрузок между отдельными агрегатами этой станции.

#### Литература

1. Руководящие указания по выбору наиболее выгодного распределения активной нагрузки между тепловыми электростанциями. ГЭИ, М., 1958.

2. Э. Б. Ахундов, В. С. Каханович. К вопросу непосредственного замера относительного прироста энергоустановок. Тр. Инст. энергетики АН БССР, вып. 10, Изд. АН БССР, Минск, 1959.

3. Н. Г. Зайцев. Автоматизация наиболее выгодного распределения активных нагрузок в энергосистемах с гидростанциями. Изв. Карел. и Кольск. филиалов АН СССР, № 3, 1959.

4. Г. Корн, Т. Корн. Электронные моделирующие устройства (на постоянном токе). ИЛ, М., 1955.

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ РАСЧЕТА И РЕГИСТРАЦИИ РАСХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРОВОГО КОТЛА

Г. А. БОРИСОВ

Для распределения тепловой нагрузки между параллельно работающими паровыми котлами наиболее выгодным образом необходимо иметь достаточно точные расходные характеристики их, на основе которых можно получить первые производные расходных характеристик котлов. Распределение нагрузки будет наиболее выгодным, если первые производные вводимой в агрегаты энергии (топлива) по полезно получаемой от агрегатов энергии (пару) равны между собой:

$$b_1 = b_2 = \dots = b_n. \quad (1)$$

Первые производные  $b$  получили название относительных приростов расхода топлива.<sup>1</sup>

Распределение нагрузок наиболее выгодным образом имеет смысл, если используемые при этом характеристики относительных приростов в момент распределения соответствуют истинным, объективно существующим характеристикам.

Так как характеристики относительных приростов получаются простым дифференцированием расходных характеристик, то сказанное относится и к расходным характеристикам.

<sup>1</sup> В дальнейшем вместо термина «относительный прирост расхода топлива» для краткости употребляется выражение «относительный прирост».

п 44308



В любой момент времени количество получаемого от котла тепла  $Q$  равно введенной в котел энергии за вычетом потерь:

$$Q = B - \Delta B, \quad (2)$$

где  $B$  — расход энергии в виде топлива на производство  $Q$ ;  $\Delta B$  — потери тепла.

При этом величина потерь  $\Delta B$  может колебаться в значительных пределах, так как зависит от состава топлива, загрязненности рабочих поверхностей, качества регулирования процесса горения и, так называемых, переходных потерь. Расходная характеристика, представляющая собой зависимость  $B = f(Q)$ , при этом может принимать многочисленные положения и менять форму по сравнению с той, которая имелась во время испытаний.

Распределение нагрузок можно производить только после снятия всей расходной характеристики ввиду невозможности дифференцирования кривой по отдельной ее точке. Так как на получение всех точек расходной характеристики требуется некоторое время, то за это время характеристика вследствие названных выше причин может измениться. Для уменьшения отклонения характеристики необходимо: 1) сокращение промежутка времени между снятием и использованием характеристики; 2) введение коррективов на изменение состава топлива; 3) регулирование процесса горения наилучшим образом, т. е. введение автоматик горения.

В настоящее время данные для получения характеристики относительных приростов  $b = f(Q)$  берутся из проводимых раз в 1—2 года эксплуатационных испытаний паровых котлов. При проведении испытаний вручную считываются показания приборов и производится вычисление отдельных точек расходной характеристики. В это время котел ведут в стационарном режиме, чтобы исключить влияние переходных режимов на потери топлива. После обработки результатов испытаний получают на графике совокупность точек, по которым проводится усредненная кривая. Эта кривая принимается за расходную характеристику парового котла. Следует отметить, что на графике одному значению расхода пара может соответствовать несколько значений расхода топлива, поэтому правильнее бы было про-

водить не приближенную кривую по этим точкам, а по координатам точек вычислять наиболее вероятную кривую.

По полученным расходным характеристикам графическим методом получают характеристики относительных приростов, которые и используют при распределении нагрузки между параллельно работающими котлами.

Чаще, чем один раз в 1—2 года, проводить испытания паровых котлов затруднительно из-за их сложности, а следовательно, больших затрат средств и рабочего времени. Так как показатели работы котла меняются во времени, то достоверность характеристик, получаемых по данным испытаний, чрезвычайно низка [1].

Для получения характеристик, достаточно близких к истинным, необходимо иметь автоматическое устройство, которое бы непрерывно производило расчет точек расходной характеристики котла без участия человека и без вывода котла на специальный испытательный режим, как это имеет место при обычных способах испытаний. Последнее обстоятельство особенно подчеркивает преимущества автоматического устройства, так как позволяет производить замеры переменных параметров котла в натурном неустановившемся режиме. Время, необходимое для снятия расходной характеристики, должно быть незначительным, чтобы считать характеристику неизменной во времени.

Если за 1—2 года характеристика относительных приростов котла [1] изменяется на 20—27%, то суточный срок между снятием и использованием характеристики будет вполне достаточным, чтобы считать ее неизменной в течение этого промежутка времени.

Погрешность устройства при вычислении точек расходной характеристики не должна превышать погрешностей датчиков параметров котла, т. е. 2%. С другой стороны, снижение погрешностей устройства менее 1.5—1.0% повлечет за собой значительное усложнение и удорожание его [2]. Отвечающими этим требованиям являются вычислительные устройства непрерывного действия, которые в данном случае будут без преобразователей сочетаться с датчиками переменных параметров парового котла, имеющими на выходе величины в аналоговой форме. Скорость работы таких устройств вполне достаточна, чтобы производить вычисления в на-



туральном масштабе времени, т. е. получать результаты сразу после окончания испытаний котла. Использование устройства для обработки информации без непосредственного управления котлом снижает требования к надежности и позволяет выполнять его на электронных лампах и электромеханических реле.

### Методы обработки результатов испытаний паровых котлов на экономичность

Соотношения, характеризующие экономичность работы паровых котлов, можно получить из уравнения теплового баланса, показывающего распределение энергии между полезным потоком тепла и потерями [3]. Уравнение теплового баланса, составленное в относительных единицах (нами принято в процентах), имеет вид:

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5, \quad (3)$$

где 100 — количество внесенного в топку тепла;  $q_1$  — полезно использованное тепло;  $q_2$  — тепло, теряемое с уходящими газами;  $q_3$ ,  $q_4$  — потери тепла из-за химического и физического недожога топлива;  $q_5$  — потери тепла в окружающую среду.

При получении расходной характеристики котла обычно интересует соотношение двух величин — топлива и полезно отданного тепла.

В случае, когда возможно произвести измерение расхода топлива, что имеет место на газовых и мазутных котлах, расходную характеристику можно получить не производя определения отдельных потерь котла. Такой метод, названный методом прямого баланса, не получил широкого распространения даже на таких котлах из-за невысокой точности, так как ошибка в определении количества сожженного топлива сказывается непосредственно на результате испытаний. Поэтому при выборе методики испытаний с помощью автоматического устройства предпочтительнее метод обратного баланса, при котором определяется количество полезно отпущенного тепла и каждая из потерь в отдельности.

Потери тепла с уходящими газами  $q_2$  подсчитывается как сумма произведений объемов уходящих газов на удельную теплоемкость и температуру их за вычетом

физического тепла воздуха и топлива, введенного в топку [3]. В общем случае  $q_2$  определяется по сложной формуле, по которой производить вычисления на вычислительном устройстве непрерывного действия довольно сложно. При этом из-за большого количества арифметических операций результат вычисления будет иметь большую погрешность. Ввиду этого при автоматическом подсчете потери  $q_2$  лучше пользоваться следующей упрощенной формулой [4]:

$$q_2 = \frac{t_{\text{ух. г.}} - t_{\text{возд.}}}{t_{\text{max}}} \times \left[ C' + \left( \frac{CO_{2\text{max}}}{CO_2 + CO' + CH_4'} + 1 \right) B_1 K \right] 100, \quad (4)$$

где  $t_{\text{max}}$ ,  $C'$ ,  $B_1$ ,  $K$ ,  $CO_{2\text{max}}$  — величины, постоянные для данного вида топлива;  $CO_2$ ,  $CO'$ ,  $CH_4'$  — данные анализа уходящих газов.

Несмотря на введенные упрощения, погрешность формулы (4) по сравнению с точными методами расчета невелика и дает погрешность, оцениваемую (при сжигании сухих видов топлива) в 0.1—0.2% [4]. Подсчеты  $q_2$  при работе на влажном топливе должны вестись с учетом содержания влаги в топливе. В соответствии с этим значения  $B_1$  и  $t_{\text{max}}$  в формуле (4) должны быть изменены.

Для подсчета потерь тепла вследствие химического недожога  $q_3$  можно воспользоваться формулой, приведенной в [3],

$$q_3 = 3.2\alpha CO, \quad (5)$$

где  $\alpha$  — коэффициент избытка воздуха;  $CO$  — процентное содержание окиси углерода в уходящих газах.

Потери тепла от физической неполноты сжигания  $q_4$  обусловлены потерями топлива со шлаком, а также с провалом и уносом. Они имеют место только при сжигании твердого топлива и вызываются различными причинами в зависимости от типа топки. Так как еще нет датчиков потерь от механического недожога, то в автоматическое устройство  $q_4$  можно вводить в виде сложной функции от нагрузки котла, рассчитанной заранее. Корректировать эту функцию можно по данным периодических ручных проверок.



Величина относительных потерь тепла в окружающую среду  $q_5$  определяется отношением величины  $Q_5$  ко всему внесенному в топку теплу  $B$ . Величина  $Q_5$  вычисляется для парового котла по формуле

$$Q_5 = 400\Phi + 30\,000, \quad (6)$$

где  $\Phi$  — поверхность охлаждения по общему габариту; 400 — теплопотери от 1 м<sup>3</sup> поверхности.

Так как  $Q_5$  не зависит от нагрузки котла, то величина относительных потерь  $q_5$  будет обратно пропорциональной функцией от  $B$ . Поэтому можно вводить  $q_5$  как функцию от расхода внесенного в топку тепла  $B$ .

Все вышеприведенные формулы могут быть реализованы на аналоговых вычислительных устройствах, поэтому имеется возможность сделать вычислительное устройство, вычисляющее все относительные потери парового котла по методу обратного баланса.

Для определения величины расхода топлива  $B$  в дальнейшем следует определить расход полученного от котла полезного тепла

$$Q_1 = D t_{пс.} - D t_{п.в.}, \quad (7)$$

где  $D$  — расход пара;  $t_{пс.}$  — теплосодержание острого пара;  $t_{п.в.}$  — теплосодержание питательной воды, а затем вычислить расход топлива по формуле

$$B = \frac{D(t_{пс.} - t_{п.в.})}{(1 - \Sigma q) Q_p^u}, \quad (8)$$

где  $1 - \Sigma q$  — к. н. д. парового котла.

Теплосодержание пара  $t_{пс.}$  — величина переменная, зависящая от давления  $p_{пс.}$  и температуры  $t_{пс.}$  пара, однако у котлов, работающих с регуляторами давления, отклонения температуры и давления от номинальных значений не превышают 5% [5], поэтому при таких малых отклонениях зависимости теплосодержания пара от  $t_{пс.}$  и  $p_{пс.}$  можно принять линейными, не вводя при этом значительных погрешностей.

Тогда с учетом поправок

$$Q_1 = D [t_{пс.н.} (1 + k_1 \Delta p + k_2 \Delta t) - t_{п.в.}], \quad (9)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  — постоянные коэффициенты;  $t_{пс.н.}$  — теплосодержание пара с номинальными давлением и температурой.

В формуле (9) переменными являются величины  $D$ ,  $p$  и  $t$ , определение которых может производиться приборами, установленными на котле.

Так как паровой котел может в кладке, металле, воде и паре запасать тепло, а затем отдавать его, то для произвольного промежутка времени равенство  $Q_1 = B(1 - \Sigma q)$  несправедливо. Это свойство котла, получившее название аккумулирующей способности, характеризуется количеством тепла, выделяющимся при снижении давления в барабане котла на 1 атм., и может быть вычислено по формуле [6]

$$C_0 = 1.85 \cdot 10^{-3} V' + 0.6 \cdot 10^{-3} (V - V') + 0.24 \cdot 10^{-3} G, \quad (10)$$

где  $V'$  — объем кипящей воды;  $V$  — общий объем барабанов и труб;  $G$  — вес металла, имеющего температуру кипящей воды.

С учетом аккумулирующей способности котла уравнение теплового баланса котла за некоторый промежуток времени  $T$  примет вид:

$$Q_{п.} \int_0^T B dt = \int_0^T \frac{D(t_{пс.} - t_{п.в.})}{1 - \Sigma q} dt + C_0(p_0 - p_T), \quad (11)$$

где  $p_0$  — давление в барабане котла в начальный момент интегрирования;  $p_T$  — давление в барабане в конечный момент интегрирования.

С увеличением времени интегрирования  $T$  растут абсолютные величины интегралов в формуле (11), а величина  $C_0(p_0 - p_T)$  остается неизменной. При величине  $T$ , равной нескольким часам, можно пренебречь величиной  $C_0(p_0 - p_T)$  ввиду ее малости по сравнению с величиной интегралов. Решая формулу (11) на вычислительных устройствах непрерывного действия, величину  $T$  нельзя брать более 10—15 мин. [2], поэтому для повышения точности необходимо вводить поправку на изменение давления в барабане котла. Например, снижение на 5 атм. давления в барабане котла ТП-230, работающего с нагрузкой 120 т/час, изменит величину правой части равенства (11) на 0.85 т, что при вре-



мени интегрирования в 10 мин. дает относительную погрешность в 4.25%.

Таким образом, общая формула для расчета одной точки расходной характеристики имеет следующий вид:

$$B = \frac{\int_0^T D [i_{пс.} (1 + k_1 \Delta t + k_2 \Delta p) - i_{п. в.}] dt + C_0 (p_0 - p_T)}{Q_{п.} \int_0^T \left[ 1 - \frac{t_{ух. г.} - t_{возд.}}{t_{max}} \times \right. \\ \left. \times \left[ C' + \left( \frac{CO_{2max}}{CO_2 + CO' + CH_4} + 1 \right) B_1 K \right] - \right. \\ \left. - 3.2\alpha CO - q_4(D) - q_5(B) \right] dt.} \quad (12)$$

Формула (12) имеет некоторые упрощения, что позволяет вести расчет отдельных точек расходной характеристики на аналоговом вычислительном устройстве. При работе котла ТП-230 на угле АШ влажностью 4—8%, при нагрузке 150 т/час, с колебаниями давления и температуры острого пара  $\pm 5\%$  от номинальных, коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1.35$ , погрешность в определении величины  $B$  по формуле (12) не превосходит 0.7—1.4% по сравнению с точным расчетом по методу обратного баланса [3].

#### Существующие автоматические устройства для определения экономических характеристик паровых котлов

Принцип работы автоматических устройств для определения экономических характеристик паровых котлов основан на замере к. п. д. по методу прямого или обратного баланса. Метод прямого баланса используется для котлов, работающих на жидком или газообразном топливе, так как только для этих видов топлива возможно в любой момент точно определить количество вводимого в котел топлива.

В [7] описывается аналоговое устройство для расчета к. п. д. парового котла по такому методу. Устройство определяет к. п. д. котла по среднеинтегральным значениям  $B$ ,  $Q$  и тепла  $Q_{п.в.}$  питательной воды.

Интеграторы введены в схему для сглаживания пульсаций переменных параметров. Для повышения точности подсчета переменных параметров используется введение поправок в значение  $Q_{п.в.}$  по температуре питательной воды, в тепло, получаемое с паром  $Q$ , — по давлению и температуре острого пара. Поправка на изменение калорийности топлива вводится вручную, так как отсутствуют приборы, автоматически измеряющие  $Q_{п.в.}$  В устройстве аналоговый результат расчета к. п. д. преобразуется в цифровую форму и печатается цифрочечатающим устройством на бланке, что позволяет использовать полученные результаты при расчете будущих режимов.

В устройстве фирмы «Elliot Brothers» [8] замер исходных данных производится через каждые 15 сек. и передается по линиям связи в Лондон, где на аналоговом устройстве по методу прямого баланса вычисляются скорректированные значения  $B$  и  $Q$ , преобразуются в цифровую форму и запоминаются в цифровом интегрирующем блоке. В конце интегрирующего периода, равного 15 мин., подсчитывается к. п. д. и печатается на бланке.

В основу устройства [9] положена формула для определения относительного прироста парового котла

$$\frac{b}{9.15} = \frac{1}{100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5)} - \frac{D_{ст.} \left( \frac{dq_2}{dD_{ст.}} + \frac{dq_3}{dD_{ст.}} + \frac{dq_4}{dD_{ст.}} \right)}{[100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5)]^2} \quad (13)$$

из которой путем упрощений выводится, что

$$\frac{b}{9.15} = \frac{1}{\eta} + n_5 D_{ст.} + n_6 D_{ст.}^2 \quad (14)$$

Такое упрощение приводит к несложной схеме решающего устройства, вычисляющего относительный прирост сразу, минуя расходную характеристику. При этом считается, что  $q_3 = 0$ , так как при работе котла с хорошо отрегулированной автоматикой горения котла в уходящих газах отсутствует  $q_3$ . Потеря тепла от механического недожога  $q_4$  вводится [как функция от  $Q$ ,



так как отсутствуют датчики уноса, по которым подсчитывается механический недожог. В устройстве не учитываются изменения давления и температуры острого пара.

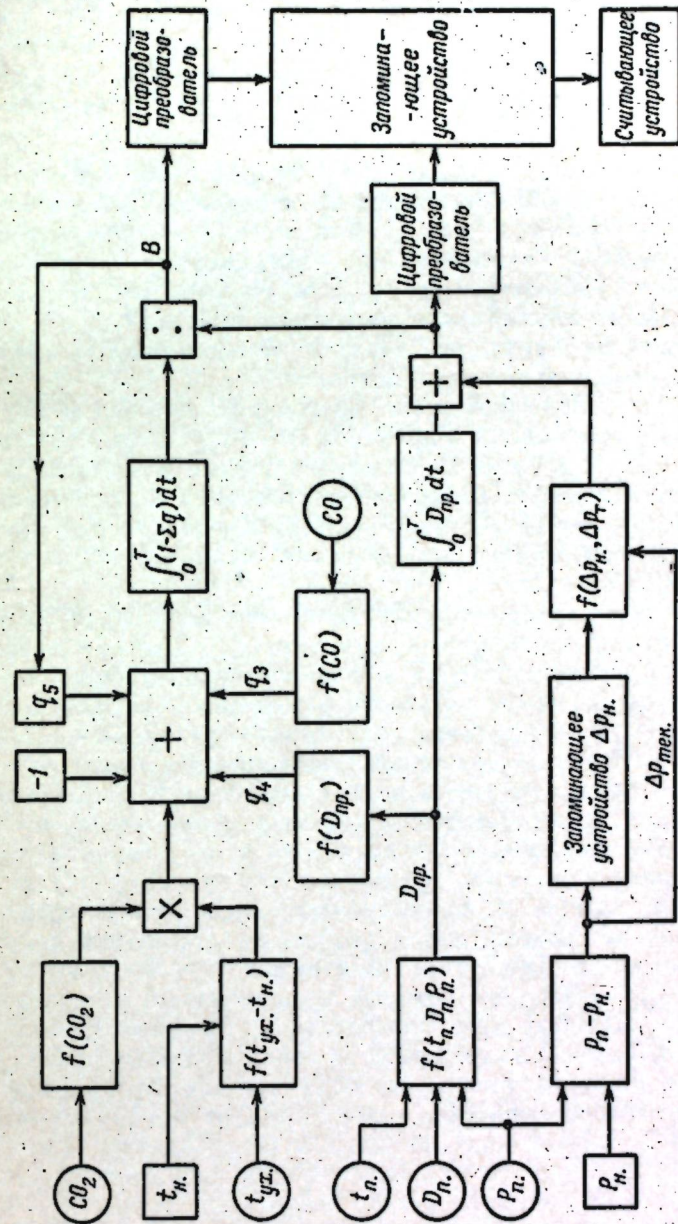
Существующие устройства для определения экономических характеристик паровых котлов автоматически получают отдельные значения к. п. д. [7, 8] или относительных приростов [9], тогда как для распределения нагрузок между котлами наиболее удобным образом нужна полная характеристика относительных приростов, получаемая из полной расходной характеристики. По отдельным значениям к. п. д. можно в той или иной степени судить об эффективности работы котла, но распределять по к. п. д. нагрузку между котлами, принципиально неправильно. В то же время наличие только одной характеристики относительных приростов не позволяет определить порядок включения в работу и вывода в резерв паровых котлов. Поэтому важно вести работу в направлении создания устройств, автоматически получающих расходные характеристики, паровых котлов.

### Структурная схема устройства и описание отдельных узлов

Структурная схема устройства (см. рисунок) построена в соответствии с принятой для решения формулой (12). Вычислительная часть устройства выполнена на усилителях постоянного тока [10]. В качестве функциональных преобразователей используются нелинейные приставки на кристаллических диодах [11].

В устройстве потери с уходящими газами  $q_2$  вычисляются по формуле (4). В данной формуле пренебрегаем переменными  $CO'$  и  $CH_4$  ввиду их малости по сравнению с величиной  $CO_2$  на котлах с хорошо отрегулированной автоматикой горения, поэтому величина потерь  $q_2$  будет зависеть в основном от переменных  $CO_2$  и  $t_{ух}$ .

Выходные напряжения приборов, пропорциональные измеряемым величинам, подаются на блок  $q_2$ , имеющий три функциональных преобразователя. Первый функциональный преобразователь на входе имеет напряжение,



Структурная схема устройства.



пропорциональное  $CO_2'$ , а на выходе — пропорциональное величине.

$$U_1 = \frac{1}{t_{\max}} \left[ C' + \left( \frac{CO_{2\max}}{CO_2'} + 1 \right) B_1 K \right]. \quad (15)$$

Напряжение  $U_1$  подается на второй и третий квадратичные преобразователи, производящие перемножение  $U_1$  с  $U_2 = t_{\text{ух.г.}} - t_{\text{возд.}}$ . Напряжение  $U_2$  получается в результате суммирования напряжения, поданного с прибора, измеряющего  $t_{\text{ух.г.}}$ , и напряжения, пропорционального температуре наружного воздуха  $t_{\text{возд.}}$ . Учет температуры наружного воздуха осуществляется вручную с помощью потенциометра.

При переводе котла на другой вид топлива в формуле (15) изменяются в пределах 10—20% коэффициенты  $t_{\max}$ ,  $C'$ ,  $B_1$  и  $K$  [4]. В таком случае первый функциональный преобразователь перенастраивается в соответствии с новыми значениями формулы (15). Перенастройка преобразователя вместе с расчетами занимает не более 1 часа.

Величина потерь от химического недожога  $q_3$  по формуле (5) пропорциональна величине  $CO$ . Так как коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  изменяется во времени незначительно, то напряжение с датчика  $CO$  подается на потенциометр, движок которого устанавливается в соответствии с величиной коэффициента  $\alpha$ , получаемого по данным систематических анализов. В результате с движка потенциометра снимается напряжение, пропорциональное произведению  $CO$  на  $\alpha$ , т. е. пропорциональное  $q_3$ .

Учет потерь от механического недожога  $q_4$  производится по данным предварительных испытаний парового котла. В результате испытаний получают зависимость  $q_4 = f(D)$ , по которой производится настройка функционального преобразователя  $q_4$ . Подавая на вход преобразователя напряжение, пропорциональное расходу острого пара, на выходе его получаем напряжение, пропорциональное относительным потерям от механического недожога. Кроме того, по данным систематических анализов можно производить подстройку преобразователя  $q_4$ .

Величина относительных потерь в окружающую среду  $q_5$  определяется расчетом  $Q_5$  по формуле (6) и

расходом тепла  $B$ , вводимого в котел с топливом, поэтому напряжение, пропорциональное  $q_5$ , получается на выходе функционального преобразователя, моделирующего зависимость  $q_5 = f(B)$ . Напряжение, пропорциональное величине  $B$ , подается на преобразователь с блока, вычисляющего  $B$ .

Все относительные потери с  $q_2$  по  $q_5$  суммируются на одном усилителе. На вход этого же усилителя с обратным знаком подается напряжение, пропорциональное 100% потерь, поэтому на выходе усилителя получается напряжение, пропорциональное величине  $100 - \Sigma q$ , т. е. величине к. п. д., который может быть измерен прибором как промежуточный результат расчета расходной характеристики котла.

Такими методами и средствами производится на вычислительном устройстве расчет подынтегрального выражения, стоящего в знаменателе формулы (12).

Подынтегральное выражение числителя в формуле (12) представляет собой величину полезного тепла, полученного от котла с учетом поправок на изменение температуры и давления острого пара. Тепло, получаемое от котла, определяется по формуле

$$Q = D l_{\text{пе.п.}} (1 + K_1 \Delta t + k_2 \Delta p), \quad (16)$$

где  $D$  — показываемый расходомером расход пара;  $l_{\text{пе.п.}}$  — теплосодержание пара с номинальными параметрами.

Логарифмируя формулу (16), получаем

$$\lg Q = \lg(D l_{\text{пе.п.}}) + \lg(1 + k_1 \Delta t + k_2 \Delta p). \quad (17)$$

По [12] формулу (17) можно без больших ошибок записать в виде

$$\lg Q = \lg(D l_{\text{пе.п.}}) + k_1 \Delta t + k_2 \Delta p, \quad (18)$$

т. е. заменить операцию умножения в формуле (16) операцией сложения, что упрощает блок по расчету полученного от котла тепла.

В устройстве напряжение, пропорциональное расходу острого пара  $D$ , умножается на постоянную  $l_{\text{пе.п.}}$ , логарифмируется с помощью логарифмического преобразователя и суммируется с напряжениями, пропорциональными  $k_1 \Delta t$  и  $k_2 \Delta p$ .



Результат суммирования подается на вторую нелинейную приставку, преобразующую  $\lg Q$  в  $Q$ .

Учет тепла, вносимого в котел с питательной водой, осуществляется путем уменьшения постоянной  $t_{п.в.}$  на величину  $t_{п.в.}$ .

Интегрирование напряжений, пропорциональных подынтегральным выражениям формулы (12), производится на интеграторах [2] со временем интегрирования, равным 10 мин. Выходное напряжение первого интегратора пропорционально величине  $\int_0^T (1 - \Sigma q) dt$ , второго —

$$\text{величине } \int_0^T (Q - D t_{п.в.}) dt.$$

Выходное напряжение второго интегратора суммируется с напряжением, пропорциональным поправке на изменение давления в барабане, учитывающей аккумуляющую способность котла. Результирующее напряжение делится на выходное напряжение первого интегратора, в результате чего получается величина, пропорциональная среднему значению расхода топлива  $B$  за время интегрирования. В состав делительного блока входит следящая система.

Благодаря тому что напряжение на выходе интегратора  $U = \int_0^T (Q - D t_{п.в.}) dt$  имеет только один знак и может только увеличиваться, следящая система может быть непереворачиваемой. Ввиду этого в ней вместо двигателя с потенциометром применен шаговый искатель с набранным на ламелях первого поля ступенчатым делителем напряжения. На делитель подается опорное напряжение, равное максимальному значению  $U$ . Снимаемое со щетки этого поля напряжение  $U'$  сравнивается усилителем, имеющим на выходе поляризованное реле, с напряжением, пропорциональным величине

$$U'' = \int_0^T (Q - D t_{п.в.}) dt - C_0 (p_0 - p_T).$$

В случае, когда  $U'' > U'$ , срабатывает реле на выходе усилителя и запускает шаговый искатель. Щетка

шагового искателя перемещается по ламелям делителя напряжения до тех пор, пока напряжение  $U''$  не становится меньше  $U'$ , так как при этом отпускает поляризованное реле и разрывает цепь пуска шагового искателя. Погрешность между напряжением  $U''$  и  $U'$  при этом не превышает величины  $\frac{1}{n}$ , где  $n$  — число ступеней делителя напряжения или ламелей шагового искателя. Таким образом, положение щетки шагового искателя оказывается пропорциональным напряжению  $U''$ .

На втором поле шагового искателя тоже набран делитель напряжения, на который подается напряжение с функционального преобразователя, обратно пропорциональное величине  $\int_0^T (1 - \Sigma q) dt$ . Так как положение

щеток шагового искателя пропорционально напряжению  $U''$ , то напряжение, снимаемое со щетки второго поля, пропорционально величине  $B$  формулы (12).

Для расчета расходной характеристики парового котла вычислительное устройство должно регистрировать результаты расчета отдельных ее точек. Для этого в устройстве имеется запоминающее устройство, составленное в виде матрицы из ферритовых колец. Каждая строка матрицы соответствует определенному количеству тепла, получаемому от котла с паром.

Так как запоминающее устройство является устройством дискретного типа, то для запоминания аналоговых расчетных величин требуется преобразование их в дискретную форму.

Напряжение, пропорциональное величине  $B$ , преобразовывается в двоичный код. Преобразователь состоит из усилителя постоянного тока, триггерной цепочки и блокинг-генератора [13]. В одну из анодных цепей каждого триггера включено реле, срабатывающее при нахождении триггера в положении «единица».

Запоминание кода, пропорционального величине  $B$ , производится в соответствующей строке ферритового запоминающего устройства, в котором каждое кольцо имеет обмотки начального подмагничивания, записи и считывания. При замыкании контактов реле преобразователя по обмоткам записи соответствующих столбцов ферритовой матрицы протекает ток записи. Ток началь-



ного подмагничивания подается в строку, номер которой пропорционален количеству тепла, получаемому от котла с паром. Подача тока подмагничивания происходит через ламели и щетку третьего поля шагового искателя следящей системы. Как мы видели ранее, положение щеток следящей системы оказывается пропорциональным получаемому от котла теплу. Ферритовые кольца, расположенные на пересечении токов подмагничивания и записи, переходят в состояние «единица», сохраняя его до стирания записи.

Перед записью двоичного кода в строку происходит стирание записанной в ней информации, поэтому данные, характеризующие экономичность котла, непрерывно обновляются. Считывание записанной в матрице информации можно производить обычным путем<sup>[13]</sup>.

Применение в регистрирующей части устройства шагового искателя позволяет заметно удешевить устройство, так как этим заменяется следящая система, несколько точных потенциометров и коммутатор для выбора строки запоминающего устройства. Ферритовое запоминающее устройство имеет небольшие размеры и сохраняет записанную в нем информацию при потере напряжений на устройстве.

Вычислительное устройство работает по жесткой циклической программе. Управляется оно от блока управления, который задает интервалы между командами и последовательность команд.

Расчетная среднеквадратичная погрешность устройства при выполнении вычислений по получению расходной характеристики не превышает 1,5%, что примерно соответствует погрешности при ручных испытаниях котлов.

### Выводы

1. Распределение нагрузок между котлами наилучшим образом имеет смысл, если используемые при распределении характеристики соответствуют истинным с достаточной степенью точности.

2. В целях повышения точности получаемых характеристик необходимо участие испытания паровых котлов. Практически это можно сделать только с помощью автоматических вычислительных устройств.

3. Автоматические устройства должны производить расчет точек расходной характеристики с учетом аккумулялирующей способности котла методом обратного баланса.

4. Для этих целей можно применить описываемое вычислительное устройство.

### Литература

1. Э. Б. Ахундов, В. С. Каханович. К вопросу непосредственного замера относительного прироста энергоустановок. Тр. Инст. энергетики АН БССР, вып. X, Минск, 1959.
2. Г. Корн, Т. Корн. Электронные моделирующие устройства (на постоянном токе). ИЛ, М., 1955.
3. С. Б. Гатеев. Теплотехнические испытания котельных установок. ГЭИ, М. — Л., 1959.
4. М. Б. Равич. Упрощенная методика теплотехнических расчетов. Изд. АН СССР, М., 1955.
5. А. С. Горшков. Техничко-экономические показатели тепловых электрических станций. ГЭИ, М. — Л., 1949.
6. В. Д. Миронов. О динамических свойствах барабанных котлов по давлениям и расходам пара. Теплоэнергетика, № 12, 1955.
7. T. S. Imsland, A. I. Hornfesk. Electromechanical Power Station Efficiency Analyzer. Automatical Control, v. 9, № 5, 1956.
8. Electronic Control for Natural Gas-Fired Boilers. The Gas World, v. 147, 3839, 1958.
9. В. М. Сильков, М. А. Оксанич, Г. Ф. Папченко. Вычислительное устройство для расчета относительного прироста расхода топлива и к. п. д. паровых котлов. Матер. совещ. по применению новой вычислит. техники при проектировании и эксплуатации энергосистем, Киев, 1960.
10. А. Н. Лебедев. Счетно-решающие устройства. Машгиз, М., 1956.
11. Г. М. Петров. Применение полупроводниковых диодов в схемах нелинейных блоков электромоделлирующих установок. Автоматика и телемеханика, № 8, 1956.
12. А. Н. Крылов. Лекции о приближенных вычислениях. ГИИТЛ, М., 1954.
13. А. А. Фельдбаум. Вычислительные устройства в автоматических системах. Физматгиз, М. — Л., 1959.



## ТОЧНОСТЬ, ТРЕБУЕМАЯ ОТ АВТОМАТИЧЕСКИХ, УСТРОЙСТВ ДЛЯ НАИВЫГОДНЕЙШЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНЫХ НАГРУЗОК В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Н. Г. ЗАЙЦЕВ

Целью наивыгоднейшего распределения активных нагрузок между электростанциями является получение определенной экономической выгоды. При проектировании и создании автоматических устройств, осуществляющих наивыгоднейшее распределение, и в особенности при определении точности, с какой должны работать указанные устройства, это положение должно быть одним из исходных.

Действительно, в зависимости от применяемой аппаратуры автоматизация может предусматривать различную степень точности осуществления наивыгоднейшего распределения нагрузок между электростанциями. Однако по мере того как точность распределения нагрузок увеличивается, соответственно увеличивается и стоимость средств автоматизации, причем по мере увеличения точности она повышается очень быстро. В то же самое время экономический эффект от осуществления наивыгоднейшего распределения со все увеличивающейся точностью повышается незначительно. Очевидно, что существует какая-то степень точности, при которой эффект от автоматизации наивыгоднейшего распределения нагрузок получается наибольшим. При осуществлении наивыгоднейшего распределения нагрузок с точностью

большей, чем указанная, средства автоматизации настолько удорожаются, а получаемая выгода от снижения стоимости электроэнергии за счет экономии топлива настолько мала, что повышение точности оказывается невыгодным.

Прежде чем переходить непосредственно к рассмотрению вопроса о величине оптимальной точности автоматических устройств для наивыгоднейшего распределения нагрузок, следует ввести некоторые определения и формулировки.

### Погрешность распределения

Как известно, характеристикой точности является величина погрешности, допускаемой при данных условиях; погрешность же есть разность между точным (истинным) значением какой-либо величины и ее приближенным значением. Таким образом, нам следует выяснить, с погрешностью какой величины, характеризующей наивыгоднейшее распределение нагрузок, мы будем оперировать и что следует принимать за точное значение этой величины.

При заданных конкретных условиях работы энергосистемы существуют объективно, во-первых, такое распределение нагрузок между электростанциями, которое является наивыгоднейшим, и, во-вторых, точные характеристики относительных приростов расхода топлива<sup>1</sup> для каждой электростанции, хотя они нам и неизвестны. Так как между величиной относительного прироста и мощностью для данной электростанции существует однозначная<sup>2</sup> зависимость, то наивыгоднейшее распределение нагрузок однозначно определяется заданием величин относительных приростов для каждой электростанции. Будем считать, что при обеспечении наивыгоднейшего

<sup>1</sup> В дальнейшем вместо термина «относительный прирост расхода топлива (воды)» для краткости употребляется выражение «относительный прирост».

<sup>2</sup> У гидростанций, вообще говоря, эта зависимость многозначная, так как одной величине относительного прироста соответствует несколько различных мощностей. Однако в этом случае задается еще и число работающих агрегатов, так что эта многозначность ликвидируется.



распределения точные относительные приросты электростанций удовлетворяют равенству

$$\frac{b_1}{1 - \sigma_1} = \frac{b_2}{1 - \sigma_2} = \dots = \frac{b_m}{1 - \sigma_m} = \frac{\lambda_1 \cdot q_1}{1 - \sigma_{Г. 1}} = \frac{\lambda_2 q_2}{1 - \sigma_{Г. 2}} = \dots = \frac{\lambda_l q_l}{1 - \sigma_{Г. l}}, \quad (1)$$

где  $b_1; b_2; \dots; b_m$  — относительные приросты тепловых электростанций;  $q_1; q_2; \dots; q_l$  — относительный прирост гидравлических электростанций;  $\sigma_1; \sigma_2; \dots; \sigma_m; \sigma_{Г. 1}; \sigma_{Г. 2}; \dots; \sigma_{Г. l}$  — относительные приросты потерь в сети по нагрузкам соответствующих электростанций;  $\lambda_1; \lambda_2; \dots; \lambda_l$  — некоторые постоянные коэффициенты, которые должны быть выбраны так, чтобы расход воды данной гидростанцией за рассматриваемый промежуток времени был равен заданному, определяемому или условиями естественного стока, или же диспетчерским графиком сработки водохранилища.

В дальнейшем изложении эти относительные приросты будем обозначать через  $b_{т.}$  с соответствующим индексом, указывающим номер электростанции.

При осуществлении наивыгоднейшего распределения нагрузок на практике электростанции будут работать с мощностями, которым по точным, истинным характеристикам относительных приростов соответствуют относительные приросты  $b_{д.}$ , вообще говоря, не удовлетворяющие равенству (1) за счет допускаемых погрешностей. Разность между значением относительного прироста  $b_{т.}$ , удовлетворяющим равенству (1), и значением относительного прироста  $b_{д.}$ , с которым работает электростанция в действительности, и характеризует точность нашего распределения. Будем называть эту разность погрешностью распределения и обозначать  $\Delta b$ . При определении точности обычно пользуются понятием относительной погрешности  $\beta$  (в %), которая является более полной характеристикой точности

$$\beta = \frac{\Delta b}{b_{\max}} 100,$$

где  $b_{\max}$  — наибольшее возможное в энергосистеме значение относительного прироста.

Так как  $\Delta b$  и  $\beta$  находятся в однозначной зависимости, то будем употреблять их в зависимости от удобства, особо этого не оговаривая.

В самом общем случае для разных электростанций величины погрешностей распределения в один и тот же момент времени имеют различные значения. Из всех этих значений можно выбрать наибольшее. Эту максимальную погрешность распределения и примем в качестве критерия точности распределения нагрузок в энергосистеме. Так, например, если в данный момент времени погрешность распределения для одной из станций равна 5%, а для всех других имеет величину меньшую, чем эта, то будем говорить, что погрешность распределения нагрузок в энергосистеме составляет 5%. При этом следует иметь в виду, что в действительности на всех станциях, за исключением одной, она меньше.

Величины погрешностей распределения отдельных электростанций обусловлены двумя следующими причинами. Во-первых, характеристики относительных приростов отдельных электростанций, в соответствии с которыми производится наивыгоднейшее распределение на практике (назовем их расчетными характеристиками), отличаются от действительных, истинных характеристик относительных приростов, объективно существующих для электростанций при данных конкретных условиях. Во-вторых, вследствие погрешностей, допускаемых при расчете и осуществлении наивыгоднейшего распределения, относительные приросты электростанций отличаются от тех значений относительных приростов, которые должны быть получены при точном распределении нагрузок в соответствии с расчетными характеристиками.

На рис. 1 изображена расчетная характеристика относительных приростов  $i$ -той электростанции (сплошная линия). Там же пунктиром изображена действительная, истинная характеристика.<sup>1</sup> Как видно из рисунка, относительному приросту системы  $b$  по действительной характеристике соответствует нагрузка электростанции, равная  $P_{т.}$  По расчетной характеристике этому же приросту соответствует нагрузка  $P_{р.}$  Вследствие же погреш-

<sup>1</sup> Она может быть расположена и любым другим образом по отношению к расчетной характеристике. Суть рассуждений это не меняет.



ностей при расчете мы определяем нагрузку станции, равную  $P_{д.}$  По истинной характеристике (рис. 1) нагрузке  $P_{д.}$  которую мы назначаем для  $i$ -той электростанции, считая ее за наимыгоднейшую, соответствует величина относительного прироста  $b_{д.}$ , отличающаяся от  $b_{т.}$

Разность  $\Delta b = b_{т.} - b_{д.}$  и является погрешностью распределения. Ее можно представить в следующем виде:

$$\Delta b = b_{т.} - b_{д.} = b_{т.} - b_{р.} + b_{р.} - b_{д.} = \Delta b_{х.} + \Delta b_{р.} \quad (2)$$

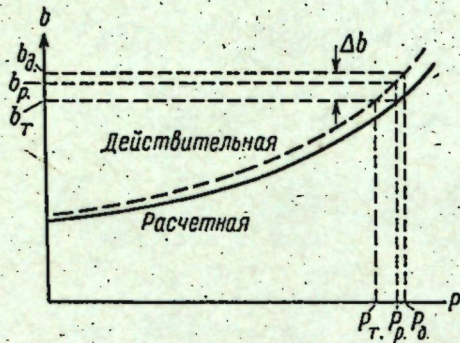


Рис. 1. Расчетная и действительная характеристики относительных приростов электростанции.

т. е. можно считать, что погрешность распределения состоит из двух составляющих. Составляющая  $\Delta b_{х.}$  обусловлена погрешностью расчетной характеристики, составляющая же  $\Delta b_{р.}$  — погрешностью расчета и осуществления результатов расчета. Отметим, что  $\Delta b_{р.}$  является величиной случайной.

С точки зрения определения оптимальной точности автоматических устройств для наимыгоднейшего распределения нагрузок представляет интерес только составляющая  $\Delta b_{р.}$  погрешности распределения, так как именно она обусловлена несовершенством средств автоматизации. Составляющая  $\Delta b_{х.}$  от средств автоматизации не зависит. Высказывались мнения [1], что так как расчетные характеристики уже имеют погрешность  $\Delta b_{х.}$ , величина которой по некоторым данным [2] достигает  $\pm 5$  и даже  $\pm 7\%$ , и поскольку  $\Delta b_{р.}$  то положительно, то отрицательно, следовательно, нет оснований стремиться снижать погрешность  $\Delta b_{р.}$  также ниже этой величины.

Такое утверждение ничем не обосновано и не является правильным. Оно было бы в известной степени справедливым, если бы потери топлива при отклонении распределения от наимыгоднейшего за счет погрешностей распределения зависели бы от последних в первой степени. Покажем, что в действительности это не так.

### Зависимость потерь топлива от погрешности расчета $\Delta b_{р.}$

Для удобства изложения весь анализ будем проводить лишь для энергосистем с тепловыми электростанциями. Результаты анализа в одинаковой степени справедливы и для энергосистем с гидростанциями. Это следует из того, что выбором коэффициентов  $\lambda$  вода приравнивается к топливу, а так как количество воды, которое может израсходовать гидростанция, строго определено, то «перерасход» воды является фактически перерасходом топлива на тепловых электростанциях.

Рассмотрим энергосистему, состоящую из  $m$  тепловых электростанций.<sup>1</sup> Пусть нагрузка системы в рассматриваемый момент времени равна  $P$ , и наимыгоднейшее распределение этой нагрузки между электростанциями характеризуется величинами  $b_{т. i}$  и  $P_{т. i}$ . Действительное же распределение характеризуется величинами  $b_{д. i}$  и  $P_{д. i}$ .

Разность  $\Delta b_{i} = b_{т. i} - b_{д. i}$  является погрешностью распределения для соответствующей электростанции, вследствие чего в целом по энергосистеме наблюдается перерасход топлива по сравнению с тем расходом, который был бы при наимыгоднейшем распределении. Определим величину этого перерасхода в функции от  $\Delta b_{i}$ .

Поскольку величина нагрузки системы не зависит от распределения, а является заданной, то справедливо равенство

$$\sum_{i=1}^m P_{д. i} = \sum_{i=1}^m P_{т. i} = P, \quad (3)$$

которое может быть переписано в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^m (P_{д. i} - P_{т. i}) = \sum_{i=1}^m \Delta P_{i} = 0, \quad (4)$$

<sup>1</sup> Для простоты потери в сети не учитываем; сути выводов это не меняет.



т. е. отклонения нагрузок от наиболее выгодных на различных станциях имеют разные знаки — часть из них положительна, а часть отрицательна. Для определенности предположим, что на первых  $k$  станциях  $\Delta P$  положительно, а на всех последующих  $\Delta P$  отрицательно.

Ввиду малости  $\Delta P$  можно считать, что

$$\Delta P_i = P'_i \Delta b_i, \quad (5)$$

где  $P'_i = \frac{\partial P_i}{\partial b_i}$  при  $b_i = b$ , т. е. относительном приросте, соответствующем наиболее выгодному.

На первых  $k$  электростанциях по сравнению с наиболее выгодным распределением в единицу времени будет перерасход топлива, определяемый равенством

$$B_{\text{пер.}} = \sum_{i=1}^k \left( b + \frac{1}{2} \Delta b_i \right) \Delta P_i. \quad (6)$$

А на последних  $m - k$  станциях будет соответственно экономия

$$B_{\text{экон.}} = \sum_{i=k+1}^m \left( b - \frac{1}{2} \Delta b_i \right) \Delta P_i. \quad (7)$$

В целом по энергосистеме будет перерасход топлива, равный разности (6) и (7), которую с учетом (4) можно записать как

$$B_{\text{пер.}} = \sum \frac{1}{2} \Delta b_i \Delta P_i. \quad (8)$$

Учитывая (5), равенство (8) можно переписать в следующем виде:

$$B_{\text{пер.}} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} P'_i \Delta b_i^2. \quad (9)$$

Так как  $\Delta b_i$  можно представить в виде суммы двух слагаемых (2), т. е.  $\Delta b_i = \Delta b_{x,i} + \Delta b_{p,i}$ , то окончательно

$$B_{\text{пер.}} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} P'_i (\Delta b_{x,i} + \Delta b_{p,i})^2 = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} P'_i \Delta b_{x,i}^2 + \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} P'_i \Delta b_{p,i}^2 + \sum_{i=1}^m P'_i \Delta b_{x,i} \Delta b_{p,i}. \quad (10)$$

Перерасход топлива в такой энергосистеме за длительный промежуток времени будет выражаться соответственно тремя интегралами

$$\int_0^T B_{\text{пер.}} dt = \int_0^T \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} P'_i \Delta b_{x,i}^2 dt + \int_0^T \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} P'_i \Delta b_{p,i}^2 dt + \int_0^T \sum_{i=1}^m P'_i \Delta b_{x,i} \Delta b_{p,i} dt. \quad (11)$$

Так как величины  $\Delta b_{p,i}$  являются случайными, то в соответствии с законом распределения случайных величин [3] следует считать, что среди большого числа их имеется одинаковое число как положительных, так и отрицательных значений. Поскольку нет никаких оснований отдавать предпочтение значениям этих величин с одним знаком перед значениями их же с противоположным знаком, то следует признать, что подынтегральная функция третьего интеграла правой части равенства (11) имеет одинаковое число отрицательных и положительных значений.

Учитывая это обстоятельство, можно считать, что третий интеграл правой части равенства (11) будет по величине близок нулю. Во всяком случае он будет мал по сравнению с любым из двух предыдущих членов. Это дает право утверждать, что приближенно перерасход топлива в энергосистеме за длительный промежуток времени можно считать равным величине

$$\int_0^T B_{\text{пер.}} dt = \int_0^T \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} P'_i \Delta b_{x,i}^2 dt + \int_0^T \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} P'_i \Delta b_{p,i}^2 dt. \quad (12)$$

Из (12) следует, что допущение погрешностей при расчете наиболее выгодного распределения  $\Delta b_p$  увеличивает



потери топлива в энергосистеме. Величина этих потерь является квадратичной функцией от погрешности расчета  $\Delta b_p$ , каждой отдельной электростанции.

Таким образом, несмотря на то, что расчетные характеристики относительных приростов отдельных электростанций и имеют определенную погрешность по сравнению с точными, истинными характеристиками, тем не менее распределять нагрузки в соответствии с расчетными характеристиками надо точно, ибо допущение погрешностей при расчете и осуществлении наивыгоднейшего распределения (составляющей  $\Delta b_p$ ) является причиной дополнительных потерь топлива.

Так как составляющая потеря топлива, обусловленная погрешностью расчетных характеристик  $\Delta b_x$ , не зависит от точности средств автоматизации, то ее из дальнейшего рассмотрения можно исключить и определять оптимальную точность автоматических устройств для наивыгоднейшего распределения нагрузок в зависимости от величины потерь топлива, обусловленных погрешностью  $\Delta b_p$ .

#### Определение точности, требуемой от автоматики для наивыгоднейшего распределения нагрузок в энергосистемах

Определение оптимальной точности автоматических устройств для наивыгоднейшего распределения активных нагрузок следует производить, исходя из общих положений технико-экономических расчетов [4]. Обозначим годовые издержки за счет потерь топлива из-за отклонения распределения нагрузок от наивыгоднейшего через  $\Pi$  и стоимость (капитальные вложения) средств автоматики через  $A$ . Очевидно, что как величину  $\Pi$ , так и величину  $A$  следует считать функциями погрешности расчетов, т. е.

$$A = f(\beta), \quad \Pi = \varphi(\beta). \quad (13)$$

Исходя из того, что расчетные затраты должны иметь минимальное значение [4], получаем следующее выражение

<sup>1</sup> Здесь под погрешностью расчетов понимается максимальная погрешность расчетов и осуществления результатов расчетов, встречающаяся на отдельных электростанциях за рассмотренный период времени. См. предыдущий параграф этой статьи.

для определения оптимальной точности автоматических устройств для наивыгоднейшего распределения активных нагрузок:

$$\Pi + \frac{A}{T_{c.o.}} = \varphi(\beta) + \frac{f(\beta)}{T_{c.o.}} = \min, \quad (14)$$

где  $T_{c.o.}$  — срок окупаемости, принимаемый согласно рекомендациям [4], равным 8 годам.

Таким образом, задача состоит в определении функций

$$A = f(\beta) \text{ и } \Pi = \varphi(\beta).$$

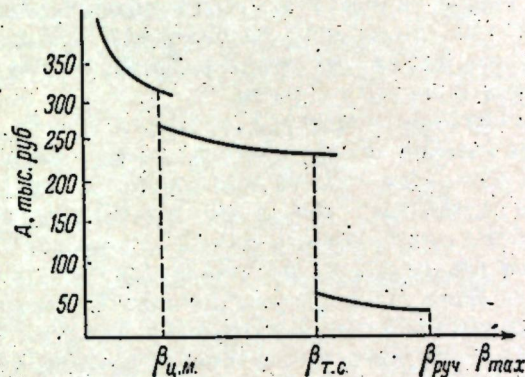


Рис. 2. Примерный вид функции  $A = f(\beta)$ .

Функция  $A$  может быть определена только при проектировании средств автоматики непосредственным калькулированием. В каждом конкретном случае вид этой функции будет различным. При современном состоянии вопроса можно предполагать, что она будет иметь вид кривых, представленных на рис. 2.

При некотором  $\beta = \beta_{р.уч.}$ , т. е. такой погрешности расчета, которой можно достичь без применения средств автоматики, стоимость последних равна нулю. В этой же точке она вследствие необходимости применения средств автоматики скачком возрастает. Первой ступенью автоматизации является применение вычислительных моделирующих устройств для производства расчетов наивыгоднейшего распределения нагрузок и простейшей автоматики на электростанциях для ведения режима по заданному графику (за исключением



электростанций, регулирующих частоту). Стоимость этих средств автоматики не может быть очень высокой и в настоящее время в зависимости от величины энергосистемы может достигать величины нескольких десятков тысяч рублей.

Второй ступенью автоматизации является внедрение телеканалов связи и переход на распределение нагрузок по их мгновенным значениям, например, одним из способов, рассмотренных в [5]. Переход на эту ступень производится в точке  $\beta = \beta_{т.с.}$ , когда ведение режима по заданным графикам не может обеспечить большей точности наиболее выгодного распределения. Так как стоимость телеканалов связи высока (порядка нескольких сот тысяч рублей), то в этой точке наблюдается скачок стоимости.

И наконец, при некоторой точности  $\beta = \beta_{ц.м.}$ , когда для обеспечения более высокой точности при производстве расчетов наиболее выгодного распределения необходимо применять цифровые вычислительные машины, наблюдается новый скачок стоимости средств автоматики (примерно на 50 тыс. руб.).

В дальнейшем по мере увеличения точности наиболее выгодного распределения нагрузок стоимость средств автоматики непрерывно и неограниченно возрастает.

Внутри отдельных ступеней (за исключением последней) повышение стоимости незначительно. Такое повышение стоимости внутри отдельной ступени обусловлено усовершенствованием отдельных элементов данного типа автоматики, и ясно, что по сравнению со всей стоимостью средств автоматики, оно будет небольшим.

Подчеркнем еще раз, что приведенная на рис. 2 функция  $A = f(\beta)$  имеет лишь иллюстративный характер, и в каждом конкретном случае она должна определяться путем расчета.

Рассмотрим методику определения функции  $\Pi = \varphi(\beta)$ . Как показывает равенство (12), потери топлива в энергосистеме вследствие допущения погрешностей при расчете наиболее выгодного распределения (составляющей  $\Delta b_p$ ) выражаются следующим образом:

$$\int_0^T B_{пер.} dt = \int_0^T \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} P'_i \Delta b_{p,i}^2 dt. \quad (15)$$

Умножив величину, стоящую в левой части равенства (15), на среднюю стоимость топлива и выбрав из правой части равенства наибольшую величину погрешности, мы и получим функцию  $\Pi = \varphi(\beta)$ . Однако определить величину  $P'_i \Delta b_{p,i}^2$  в функции от времени можно лишь произведя анализ допущенных погрешностей для каждого момента каждой электростанции данной энергосистемы в течение достаточно длительного промежутка времени, например года. Выполнить это практически крайне затруднительно, если вообще возможно.

Поэтому будем искать эту зависимость приближенно. Если принять, что все станции имеют одинаковую погрешность  $\Delta b_p$ , равную максимальной из всех встречающихся, тогда будет справедливо следующее неравенство:

$$\int_0^T \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} P'_i \Delta b_{p,i}^2 dt < \int_0^T \frac{1}{2} \Delta b_{p,max}^2 \sum_{i=1}^m P'_i dt. \quad (16)$$

Но сумма  $\sum_{i=1}^m P'_i$  есть сумма производных, следовательно, она равна производной от суммы. Сумма же есть функция, обратная суммарной характеристике относительных приростов данной энергосистемы.

Таким образом, можно написать:

$$\int_0^T B_{пер.} dt < \int_0^T \frac{1}{2} P'_c \Delta b_{p,max}^2 dt, \quad (17)$$

где  $P'_c = \frac{dP_c}{db}$  — производная от мощности системы по относительному приросту.

Если перейти от абсолютной величины погрешности  $\Delta b_p$  к относительной, то правый член неравенства (17) следует записать в следующем виде:

$$\int_0^T \frac{1}{2} P'_c \Delta b_{p,max}^2 dt = \int_0^T \frac{1}{2} P'_c b_{max}^2 \beta_{max}^2 dt. \quad (18)$$

Поскольку величина  $\Delta b_{max}$  определяется точностью выбранных автоматических устройств, то от времени



она практически не зависит, и поэтому величину  $b_{\max}^2 \beta_{\max}^2$  можно вынести за знак интеграла

$$\int_0^T \frac{1}{2} P'_c \Delta b_{p, \max}^2 dt = b_{\max}^2 \beta_{\max}^2 \int_0^T P'_c dt. \quad (19)$$

Из выражений (15) — (19) следует:

$$\int_0^T B_{\text{пер.}} dt < \frac{1}{2} \beta_{\max}^2 b_{\max}^2 \int_0^T P'_c dt. \quad (20)$$

Величина  $b_{\max}^2 \int_0^T P'_c dt$  не зависит от погрешности, и при заданной суммарной характеристике энергосистемы, которую в данном случае можно считать в течение времени  $T$  неизменной, и известном графике продолжительности нагрузок есть величина вполне определенная. Обозначим ее через  $K$ , тогда максимально возможная величина потерь топлива в энергосистеме, обусловленных погрешностью расчета, может быть записана так:

$$B_{\text{пер. max}} = \frac{K}{2} \beta_{\max}^2. \quad (21)$$

Полученное равенство (21), хотя еще и не дает величины действительных потерь топлива в энергосистеме, однако имеет большое значение, так как позволяет с достаточной обоснованностью определить верхнюю границу величины потерь топлива, обусловленных погрешностью расчета, т. е. дает основания утверждать, что при данной величине погрешности расчета потери топлива, а следовательно, и функция  $\Pi$  будет не больше какого-то определенного значения, которое может быть вычислено. Кроме того, оно наглядно показывает, что потери топлива являются квадратичной функцией погрешности расчета.

Действительные потери топлива в энергосистеме меньше, чем максимальные потери, определяемые равенством (21). Для вычисления действительных потерь топлива нет никаких данных. Поэтому приходится определять какую-то другую величину.

Так как погрешность, допускаемая при производстве расчетов и осуществлении наиболее выгодного распределения нагрузок, есть величина случайная и так как производится большое число распределений (в течение года, если принять получасовой интервал времени в задании графика, 17 тыс.), то вместо действительных потерь будем определять наиболее вероятные потери.

Наиболее вероятные потери могут быть вычислены следующим образом. Если максимальная погрешность расчета равна  $\beta_{\max}$ , то все погрешности будут меньше этого значения и распределены по величине по определенному закону. Если принять нормальный закон распределения случайных величин и допустить, что погрешность распределения не бывает больше  $\beta_{\max}$  чаще чем в одном случае из 1000 [3], то распределение погрешностей будет следующим:

Величина погрешности, в долях $\beta_{\max}$ . . . . .	До 0.2	0.2—0.4	0.4—0.6	0.6—0.8	0.8—1
Количество погрешностей, в % . . . . .	50.1	29	15.1	3.5	1.5

Так как каждая из электростанций имеет распределение погрешностей по вышеприведенному закону, то можно считать, что 50.1% выработанной энергии получены при погрешности меньшей, чем  $0.2\beta_{\max}$ , 29.8% энергии при погрешности до  $0.4\beta_{\max}$  и т. д.

Соответствующий подсчет (приложение 1) показывает, что при принятом законе распределения погрешностей для получения наиболее вероятной величины потерь топлива максимальную величину этих потерь (21) надо умножить на коэффициент, равный 0.1.

Для того чтобы получить представление о порядке этой величины, в приложении 2 произведен соответствующий подсчет потерь топлива для энергосистемы с максимумом нагрузки 2000 Мвт. Подсчет показывает, что при  $\beta = 2\%$  эта величина составляет 560 т условного топлива в год. При стоимости топлива 10 руб. за тонну у.т. это составляет около 5600 руб./год.

Следует еще раз подчеркнуть, что данные цифры являются лишь иллюстративными и в каждой конкретной системе они должны быть вычислены, исходя из действительной характеристики относительных приростов и графика продолжительности нагрузок. Однако



они тем не менее ясно указывают, что стремиться к большей точности за счет усложнения аппаратуры автоматизации не следует.

### Выводы

Характеристикой точности распределения следует считать величину погрешности между относительным приростом, удовлетворяющим равенству (1), и той величиной его, с какой работает данная электростанция в действительности. Назовем эту погрешность погрешностью распределения.

Ее можно разложить на две составляющих: погрешность характеристики  $\Delta b_x$  и погрешность расчета  $\Delta b_p$ . Первая из них обусловлена тем обстоятельством, что характеристики относительных приростов отдельных электростанций, в соответствии с которыми производится наиболее выгодное распределение (нами они названы расчетными), отличаются от действительных, истинных характеристик, объективно существующих для электростанций при данных конкретных условиях. Вторая составляющая возникает вследствие неточностей расчета при распределении нагрузок в соответствии с расчетными характеристиками.

Вследствие допущения погрешностей распределения в энергосистеме наблюдается перерасход топлива по сравнению с тем, каким бы он был при точном наиболее выгодном распределении нагрузок. Этот перерасход с достаточной точностью можно определить по формуле

$$\int_0^T B_{\text{пер}} dt = \int_0^T \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} P'_i \Delta b_{x_i}^2 dt + \int_0^T \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} P'_i \Delta b_{p_i}^2 dt. \quad (12)$$

Так как составляющая потеря топлива, обусловленная погрешностью расчетных характеристик, не зависит от точности средств автоматизации, то ее из дальнейшего рассмотрения можно исключить и определять оптимальную точность автоматических устройств для наиболее выгодного распределения нагрузок в зависимости от величины потерь топлива, обусловленных погрешностью расчета  $\Delta b_p$ .

Исходя из общих положений технико-экономических расчетов, для определения оптимальной точности средств

автоматики в данном случае получаем следующее выражение:

$$\Pi + \frac{A}{T_{\text{с.о.}}} = \varphi(\beta) + \frac{f(\beta)}{T_{\text{с.о.}}} = \min. \quad (14)$$

Так как величины  $\Pi$  и  $A$  являются функциями погрешности, то выражение (14) позволяет определить оптимальную точность средств автоматизации.

### Литература

1. В. М. Горюштин. Автоматизация регулирования частоты и распределения активных нагрузок в энергосистемах. Докл. на VII сессии Комис. по дальним электропередам при Энергет. инст. АН СССР, Изд. АН СССР, М., 1958.
2. В. М. Горюштин. Наиболее выгодные режимы работы гидростанций в энергетических системах. ГЭИ, М., 1959.
3. А. Н. Крылов. Лекции о приближенных вычислениях. Гостехиздат, М., 1954.
4. Основные методические положения технико-экономических расчетов в энергетике. Metallurgizdat, М., 1959.
5. Н. Г. Зайцев. Автоматизация наиболее выгодного распределения активных нагрузок в энергосистемах с гидростанциями. Изв. Карел. и Кольск. филиалов АН СССР, № 3, 1959.

### Приложение I

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕХОДА ОТ ВЕЛИЧИНЫ МАКСИМАЛЬНЫХ ПОТЕРЬ К НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНЫМ ПОТЕРЯМ

При нормальном законе распределения погрешностей и принятом допущении, что лишь в одном случае из 1000 величина погрешности превосходит  $\beta_{\text{max}}$ , распределение погрешностей по величине  $[\beta]$  будет следующим (см. таблицу).

Таким образом, 0.05 выработки энергии будет произведено при погрешности меньшей, чем  $0.025 \beta_{\text{max}}$ , 0.1 энергии выработано при погрешности, меньшей  $0.039 \beta_{\text{max}}$ , и т. д.

Разобьем величину максимальных потерь на 20 частей. Каждая из них должна быть уменьшена в  $\left(\frac{\beta_{\text{ср.}}}{\beta_{\text{max}}}\right)^2$  раз ( $\beta_{\text{ср.}}$  — среднее значение погрешности для данной сту-



### Распределение погрешностей по величине

Величина погрешности, в долях $\beta_{\max}$	Количество погрешностей, меньших этой величины, в долях от их общего числа	Величина погрешности, в долях $\beta_{\max}$	Количество погрешностей, меньших этой величины, в долях от их общего числа
0.025	0.05	0.23	0.55
0.039	0.1	0.255	0.60
0.059	0.15	0.285	0.65
0.081	0.20	0.315	0.70
0.099	0.25	0.35	0.75
0.115	0.30	0.4	0.80
0.135	0.35	0.44	0.85
0.155	0.40	0.51	0.90
0.18	0.45	0.63	0.95
0.205	0.5	0.999	1

пени), так как эта часть потерь получилась не при погрешности  $\beta_{\max}$ , а при погрешности, в  $\frac{\beta_{\text{ср.}}}{\beta_{\max}}$  раз меньшей.

Сложив все 20 частей, уменьшенные на эти коэффициенты, получим

$$B_{\text{вер.}} = \frac{B_{\max}}{20} \sum_{i=1}^{20} \left( \frac{\beta_{\text{ср. } i}}{\beta_{\max}} \right)^2 \cdot 0.1 B_{\max},$$

т. е. при принятом законе распределения погрешностей величину максимальных потерь топлива для получения наиболее вероятных потерь следует умножить на 0.1.

### Приложение 2

#### РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ТОПЛИВА В ФУНКЦИИ ОТ ПОГРЕШНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Принятая характеристика относительных приростов энергосистемы приведена на рис. 3. Принятый график продолжительности нагрузок в течение года приведен на рис. 4. Вместо действительного графика рассматривается ступенчатый график, который эквивалентен действительному по вырабатываемой энергии.

Вычислим величину интеграла  $\int_0^T P'_c dt$  (20) при дан-

ных условиях. При ступенчатом графике нагрузок вместо этого интеграла можно взять сумму  $\sum_{i=1}^m P'_c \Delta t$ .

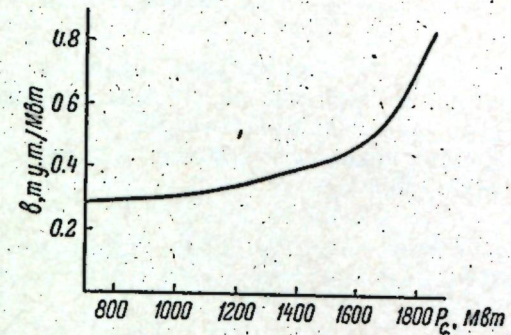


Рис. 3. Обобщенная характеристика относительных приростов системы.

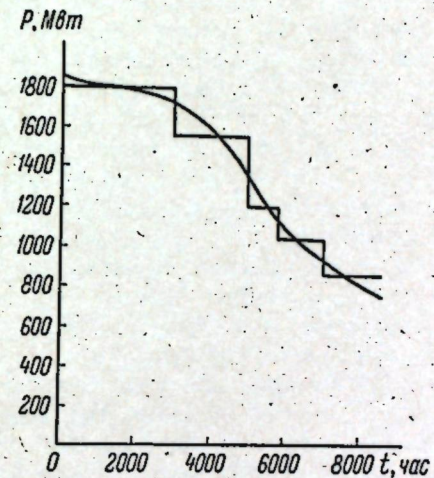


Рис. 4. График продолжительности нагрузок в течение года.

При количестве принятых ступеней, равном пяти, определяем средние для ступени величины  $P'_c$ ,  $\Delta t$ :

№ ступени	1	2	3	4	5
$P'_c$ , Мвт <sup>2</sup> · ч/т у. т.	580	1800	3520	8080	13340
$\Delta t$ , в час.	3000	2000	750	1250	1560



Величина  $K$  равна  $28 \cdot 10^6$  т у. т.

При  $\beta_{\max} = 2\%$  потери топлива

$$B_{\text{пер.}} = \frac{28 \cdot 10^6}{2} 0.02^2 = 5600 \text{ т у. т.}$$

Умножая  $B_{\text{пер.}}$  на коэффициент перехода от максимальных потерь к наиболее вероятным (приложение 1), получаем  $B_{\text{пер. вер.}} = 5600 \cdot 0.10 = 560$  т у. т., что при стоимости тонны условного топлива 10 руб. будет составлять 5600 руб./год.

## УПРАВЛЯЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО, ДЕЙСТВУЮЩЕЕ ОТ СИГНАЛОВ ТОЧНОГО ВРЕМЕНИ

Н. Г. ЗАЙЦЕВ, А. В. ТЯХТИ

При автоматизации производства во многих случаях требуется вести процесс по заранее заданной программе. Для этого необходимо иметь программные устройства, работающие в реальном масштабе времени.

Необходимой частью таких устройств являются датчики времени. Для обеспечения требуемой точности датчики приходится выполнять достаточно сложными, что может служить препятствием к широкому применению их. При этом все равно требуется специальная служба для проверки их хода [1]. Так, например, если относительная погрешность датчика времени составляет  $10^{-4}$  (а это довольно высокая точность) и для управления процессом допускается отклонение времени выдачи управляющих сигналов от астрономического не более, чем на 0.5 мин., то через каждые трое суток уже требуется коррекция хода датчика.

Представляется разумным использовать менее точные, но зато более простые датчики времени. При этом следует дополнительно предусмотреть устройство, автоматически корректирующее их ход. Например, если корректировать ход датчика один раз за каждые 12 час., то для того, чтобы отклонение времени датчика от астрономического не превышало 0.5 мин., достаточной будет точность хода датчика порядка 0.1%. Если же ход датчика корректировать чаще, чем через 12 час., то его точность может быть еще уменьшена без снижения точности подачи управляющих сигналов. Ясно, что сово-



кунность простого датчика времени с несложным устройством коррекции практически более приемлема, чем датчик времени со сложной схемой без коррекции.

В большинстве случаев можно использовать датчики времени, работающие от напряжения промышленной частоты. Подобные устройства уже существуют, например программные реле времени типа РВТ-1200 и др. Точность хода таких датчиков определяется точностью поддержания частоты в энергосистеме. Согласно «Правилам эксплуатации энергосистем», отклонение частоты от номинальной не должно превышать 0,4%. Поэтому корректировать ход датчиков, работающих от напряжения промышленной частоты, необходимо не реже одного раза за 6—12 час. Это можно осуществить с помощью устройства, задачей которого является выделение радиосигналов точного времени и выдача корректирующего сигнала в момент, соответствующий целому часу точного астрономического времени. Описаний подобных устройств в литературе до сих пор не встречалось.

Задача выделения сигналов точного времени довольно сложна, так как эти сигналы не имеют определенного признака, резко отличающего их от всех прочих сигналов радиопередач. Вследствие этого выделение их может быть сделано лишь по совокупности всех признаков, их характеризующих: частоте, длительности и количеству посылок в сигнале. При этом приходится сталкиваться со следующими трудностями. Во-первых, сигналы точного времени передаются тоном в 1000 гц, который весьма распространен в речевых и особенно музыкальных передачах. Например, диапазон звучания основных тонов некоторых музыкальных инструментов составляет: для рояля от 20 до 3000 гц, флейты 350—1100 гц, скрипки 20—4000 гц, кларнета 150—1100 гц. Поэтому прежде всего должна быть предусмотрена защита устройства от радиосигналов, хотя и имеющих частоту 1000 гц, но не являющихся сигналами точного времени (будем называть их для краткости вредными). Во-вторых, амплитуда сигналов радиопередач весьма непостоянна и изменяется в очень широких пределах в зависимости от условий распространения радиоволн, времени суток, условий приема и т. д. Для обеспечения же надежной работы устройства необходимо иметь постоянный уровень сигнала на его входе. Следовательно,

необходимо принять специальные меры для стабилизации входного сигнала. Несмотря на эти трудности, сигналы точного времени могут быть выделены и использоваться для воздействия на устройство, выдающее управляющие импульсы.

Для проверки этого положения и выявления реальной возможности создания управляющих устройств, работающих на основе выделения сигналов точного времени, было разработано и испытано устройство, структурная схема которого приведена на рис. 1. Управляющее устройство состоит из ограничителя 1, фильтра 2, усилителя низкой частоты 3, отметчика сигналов 4, изме-

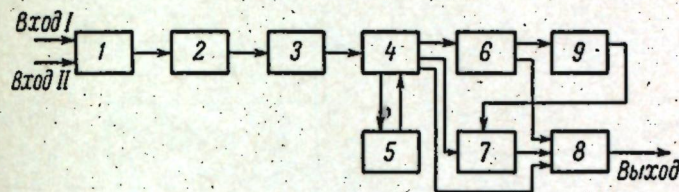


Рис. 1. Структурная схема управляющего устройства.

рителя времени пауз 5, блока задержки 6, счетчика посылок 7, схемы совпадений 8, схемы сброса 9 и блока питания (на рисунке не показан). Устройство предназначено для работы от радиоприемника (вход I) или с линии радиотрансляционной сети (вход II). Действует оно следующим образом.

Радиосигналы от любого из этих источников поступают на амплитудный ограничитель, где ограничиваются до 2 в (чем и достигается стабилизация амплитуды входного сигнала) и подаются на полосовой фильтр, настроенный на 1000 гц. Выделенные фильтром сигналы усиливаются усилителем низкой частоты и поступают на отметчик сигналов, который совместно с измерителем времени пауз реагирует лишь на сигналы длительностью, равной длительности посылки сигнала точного времени. С отметчика сигналов воздействие передается на счетчик посылок, блок задержки и схему совпадений.

Блок задержки представляет собой реле времени, которое запускается первой посылкой и выдает импульс после передачи последней посылки, приводя устройство в исходное положение. Схема совпадений срабатывает



только в том случае, если на нее одновременно подаются импульсы со счетчика и отметчика и блок задержки еще не сработал. Этим достигается проверка наличия определенного числа посылок определенной длительности и тональности за определенный промежуток времени (шесть посылок с частотой 1000 гц и длительностью в 0.5 сек. за 5 сек.) Схема совпадений срабатывает от последней посылки сигнала точного времени и выдает управляющий импульс.

Принципиальные схемы отдельных блоков и устройства в целом приведены на рис. 2—4. Радиосигналы с постоян-

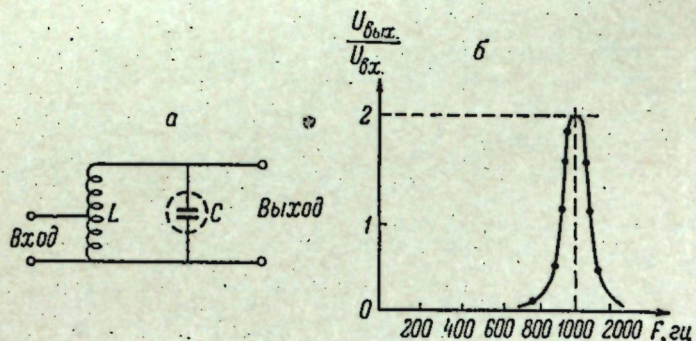


Рис. 2. Схема (а) и частотная характеристика фильтра (б).

ной амплитудой подаются на полосовой LC-фильтр [2]. Фильтр состоит из катушки индуктивности  $L$  (750 витков, провод ПЭЛШО 0.69 мм, альсиферовый тороидальный сердечник типа Т4-64 наружным диаметром 62 мм) и емкости  $C$  в 0.25 мкф. Он предназначен для выделения из радиопередач сигналов только с частотой 1000 гц. Схема включения фильтра и его характеристика представлены на рис. 2. Полоса пропускания фильтра составляет 80 гц.

С фильтра сигналы подаются на усилитель низкой частоты (УНЧ), нагруженный на выпрямитель. УНЧ может иметь любую типовую схему [3, 4], но предпочтительнее иметь УНЧ с избирательной частотной характеристикой в области средних частот, мощность которого достаточна для нормальной работы последующих блоков. УНЧ питает отметчик сигналов, который пред-

ставляет собой реле  $P_1$  (рис. 3) со временем срабатывания

$$t_1 = \tau - |\Delta t_1|,$$

где  $\tau$  — длительность передачи единичной посылки радиосигнала точного времени;  $\Delta t_1$  — возможная максимальная неточность выбора времени срабатывания.

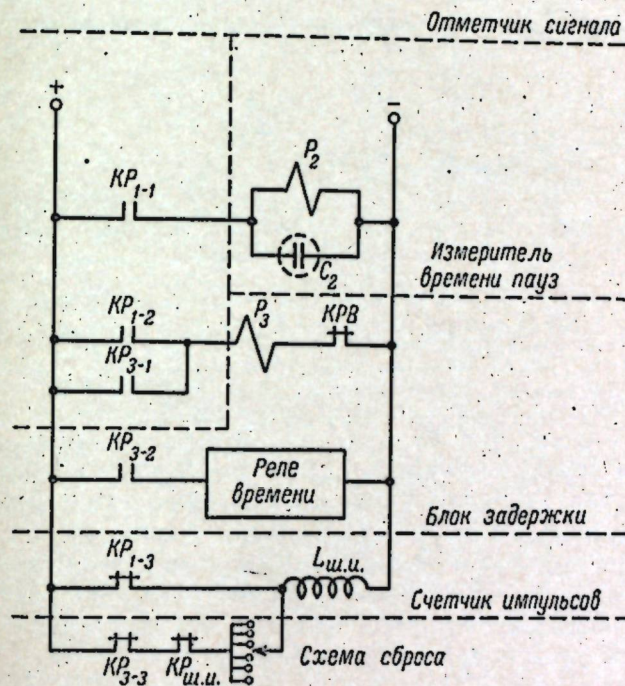
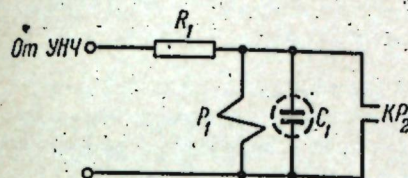


Рис. 3. Принципиальная схема, показывающая взаимодействие отдельных блоков устройства.

Время срабатывания реле  $P_1$  зависит от емкости  $C_1$ , сопротивления  $R_1$  и сопротивления обмотки реле. Максимальная неточность выбора времени срабатывания



реле  $\Delta t_1$  во всех случаях не будет превышать 2—5% от  $t_1$ . Тем самым обеспечивается отстройка от целого ряда вредных сигналов, длительность которых меньше времени срабатывания реле  $P_1$ . Срабатывая, реле  $P_1$  через контакт  $KP_{1-1}$  включает реле  $P_2$  (измеритель времени пауз), время отпущения которого составляет

$$t_{отп.} = T + |\Delta t_2|,$$

где  $T$  — длительность паузы между передачей двух единичных посылок сигнала точного времени;  $\Delta t_2$  — максимальная возможная неточность отпущения реле.

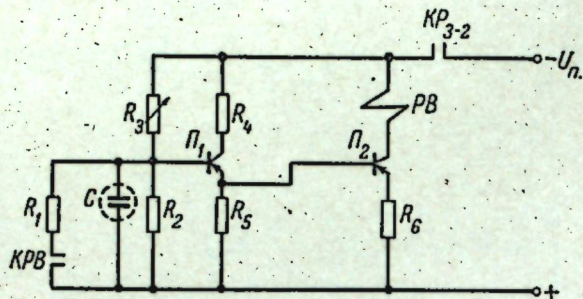


Рис. 4. Принципиальная схема блока задержки.

Данные схемы:  $R_1 = 7.5$  ком;  $C = 100$  мкф;  $R_2 = 270$  ком;  $R_3 = 3$  ком;  $R_4 = 000$ ;  $R_5 = 3$  ком;  $R_6 = 0.39$  ком;  $PB$  — реле типа РКН;  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  — триоды типа П-15.

Выбором такого времени отпущения реле обеспечивается отстройка от вредных сигналов радиопередач, паузы между которыми превышают  $T$ . При срабатывании реле  $P_1$  через контакт  $KP_{1-2}$  включается реле  $P_3$ , контактами которого  $KP_{3-1,2}$  подается питание на блок задержки. Последний представляет собой реле времени, выполненное на двух полупроводниковых триодах (рис. 4), и имеет время срабатывания

$$t_{PB} = 5(\tau + T) + |\Delta_{PB}t|,$$

где  $\Delta_{PB}t$  — возможная максимальная неточность времени срабатывания реле.

Реле времени запускается первой посылкой сигнала точного времени и срабатывает после передачи всех посылок, размыкая свой нормально замкнутый контакт и обеспечивая реле  $P_3$ , которое размыканием контакта  $KP_{3-4}$  (рис. 5) разрывает цепь подачи управляющего импульса.

Временная диаграмма работы управляющего устройства приведена на рис. 6.

Счетчиком посылок в данном устройстве является шаговый искатель типа ШИ-25/8, схема включения которого приведена на рис. 6. При замыкании контакта  $KP_{1-3}$ , т. е. с приходом первой посылки радиосигнала точного времени, подается питание на обмотку шагового искателя, подвижные контакты которого с нулевой ламели

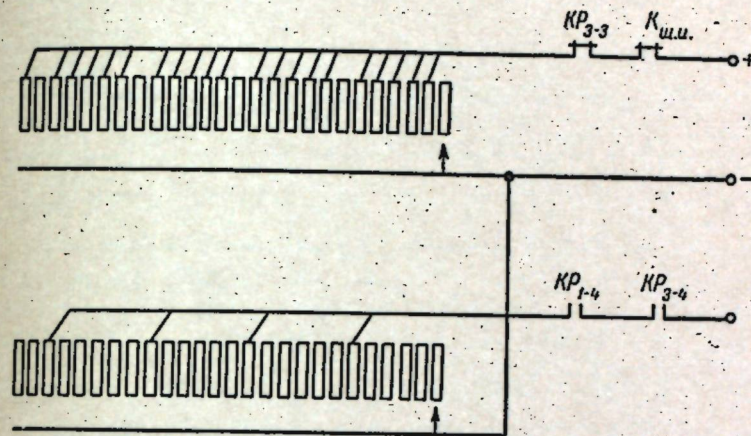


Рис. 5. Схема включения шагового искателя.

переходят на первую, при второй посылке — на вторую, и так далее до поступления последней посылки. В момент ее передачи контакты находятся на 5-й или любой другой  $5 + 6n$  (где  $n = 1, 2, 3$ ) ламели, с которой через замкнутые в это время контакты  $KP_{1-4}$  и  $KP_{3-4}$  (так как блок задержки еще не сработал) подается управляющий импульс. После выдачи управляющего импульса подвижные контакты искателя переходят на шестую ламель, и в следующий час счетчик начинает работать с 6-й ламели до 12-й и т. д. Этим уменьшается степень износа шагового искателя.

В случае приема ложных одиночных сигналов с частотой 1000 гц и длительностью, равной длительности посылок сигнала точного времени, устройство хотя и запускается, но управляющего импульса не выдает. Объясняется это тем, что за время, определяемое блоком задержки, шаговый искатель не сможет достичь пятой



ламель, с которой выдается управляющий импульс, так как поступление за это время пяти вредных сигналов практически совершенно исключено. После срабатывания блока задержки обесточивается реле  $P_3$ , и через контакты  $KP_{3-3}$  и  $K_{ш.п.}$  искатель устанавливается в исходное положение.

Результаты испытания устройства показали полную возможность создания управляющих устройств, действу-

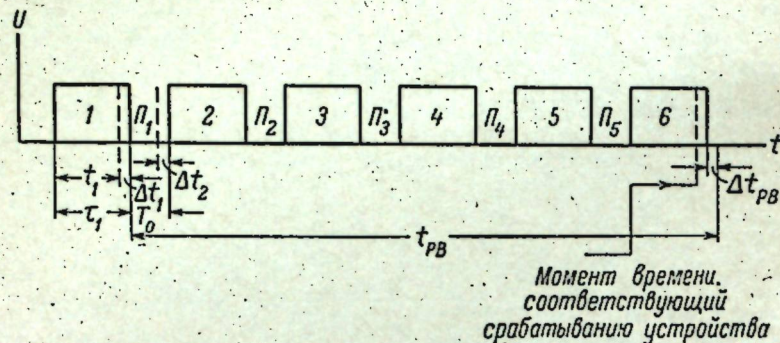


Рис. 6. Временная диаграмма работы управляющего устройства.

ющих от сигналов точного времени. Испытания проводились от радиотрансляционной сети, ложного срабатывания устройства не наблюдалось. Схема полностью собрана на полупроводниках и реле, обладает высокой надежностью и малым потреблением мощности. Стоимость испытанного устройства 74 руб.

В случае работы от радиоприемника удорожание устройства будет весьма незначительным, так как требования к приемнику в данном случае весьма невысоки (приемник может принимать только местную станцию, работающую достаточное количество времени, частотная характеристика его практически может быть любой). Таким образом, возможность использования менее сложных датчиков времени, но с дополнением простого устройства коррекции, практически вполне возможна.

#### Литература

1. Е. М. Мартынов. Электронные устройства дискретного действия. ГЭИ, М., 1960.
2. И. Д. Босый. Электрические фильтры. Гостехиздат, М., 1957.
3. К. Э. Эрглис, И. П. Стенаненко. Электронные усилители. Физматгиз, М., 1961.
4. А. А. Рязкин. Полупроводниковые усилители. Связьиздат, М., 1961.

## ЭКОНОМИЧНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНЫХ НАГРУЗОК НА ЦВМ «МИНСК-1»

Г. В. ВОЙНОВА, А. С. ЛАНЦМАН

В настоящее время необходимость применения вычислительной техники для расчетов экономичного распределения активных нагрузок в энергосистемах является очевидной. Для этой цели можно использовать как аналоговые, так и цифровые вычислительные машины. Однако, какому же из этих типов машин следует отдать предпочтение, до сих пор не ясно. Решить этот вопрос можно только после накопления достаточного количества фактического материала.

Настоящая работа является описанием программы расчета экономичного распределения активных нагрузок в южной части Карельской энергосистемы, составленной на цифровую вычислительную машину (ЦВМ) «Минск-1».

Известно [1], что условием оптимальности распределения нагрузок является выполнение соотношений

$$\frac{b'_1}{1-\sigma_1} = \frac{b'_2}{1-\sigma_2} = \dots = \frac{b'_n}{1-\sigma_n} = \lambda_1 \frac{q_1}{1-\sigma_{21}} = \dots = \lambda_2 \frac{q_2}{1-\sigma_{22}} = \dots = \lambda_m \frac{q_m}{1-\sigma_{2m}}, \quad (1)$$

где  $q_i$  — относительные приросты расхода воды<sup>1</sup> соответствующих ГЭС;  $b'_j$  — относительные приросты соот-

<sup>1</sup> В дальнейшем вместо термина «относительный прирост расхода воды (топлива)» для краткости употребляется выражение «относительный прирост».



ветствующих теплоэлектростанций;  $\frac{1}{1-\sigma}$  — поправочные коэффициенты к относительным приростам станций, учитывающие потери мощности в электрических сетях;  $\lambda_i$  — постоянные коэффициенты, подбираемые для ГЭС таким образом, чтобы на каждой из них соблюдался баланс воды.

Правильность выбора этих коэффициентов гарантируется выполнением равенств

$$\sum_{j=1}^{24} Q_{ij} = W_i \quad (i=1, 2, \dots, m), \quad (2)$$

которые в случае непрерывного изменения нагрузок принимают интегральную форму

$$\int_0^T Q_i dT = W_i \quad (i=1, 2, \dots, m),$$

где  $Q_{ij}$  — расход воды  $i$ -той ГЭС в течение  $j$ -того часа;  $W_i$  — заданный расход воды  $i$ -той ГЭС.

Кроме того, должно выполняться соотношение

$$q_i \approx q_{i_{\text{эк.}}} \quad (3)$$

где  $q_{i_{\text{эк.}}}$  — относительный прирост ГЭС при ее работе с наивысшим к. п. д.

Для ведения расчетов на ЦВМ характеристики относительных приростов электростанций и их расходные характеристики, задаваемые обычно графически, необходимо представить в аналитической форме.

Кривые, представляющие собой графики вышеназванных зависимостей, с любой степенью точности могут быть заменены ломаными.

Аналитическая форма характеристик относительных приростов ГЭС примет вид:

$$P_i = \begin{cases} \alpha_{i1} q_i + \beta_{i1}, & \text{если } 0 < q_i \leq q_{i1}, \\ \alpha_{i2} q_i + \beta_{i2}, & \text{если } q_{i1} \leq q_i \leq q_{i2}, \\ \dots & \dots \\ \alpha_{ik} q_i + \beta_{ik}, & \text{если } q_{i(k-1)} \leq q_i \leq q_{ik}, \\ 0, & \text{если } q_i = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $P_i$  — нагрузка  $i$ -той ГЭС.

Расходные характеристики можно представить в следующем виде:

$$Q_i = \begin{cases} \gamma_{i1} P_i + \delta_{i1}, & \text{если } 0 < P_i \leq P_{i1}, \\ \gamma_{i2} P_i + \delta_{i2}, & \text{если } P_{i1} < P_i \leq P_{i2}, \\ \dots & \dots \\ \gamma_{ik} P_i + \delta_{ik}, & \text{если } P_{i(k-1)} < P_i \leq P_{ik}, \\ 0, & \text{если } P_i = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Энергосистема южной части Карелии состоит из двух ГЭС и имеет связь по линии 110 кв с системой Ленэнерго, которая в наших расчетах принимается за одну эквивалентную теплоэлектростанцию.

Для гидроэлектростанций изменения потерь электроэнергии в сетях при изменении нагрузки столь незначительны, что ими можно пренебречь. Обозначив  $\frac{b}{1-\sigma} = b_{\text{л.}}$ , получаем условие оптимальности распределения нагрузок в следующем виде:

$$b_{\text{л.}} = \lambda_1 q_1 = \lambda_2 q_2.$$

Для теплоэлектростанции зависимость между относительными приростами и активными нагрузками имеет следующий вид:

$$P_{\text{л.}} = \frac{u^2}{2R_{\text{л.}}} \left( 1 - \frac{b}{b_{\text{л.}}} \right), \quad (6)$$

где  $u$  — усредненное напряжение линии;  $R_{\text{л.}}$  — активное сопротивление линии;  $P_{\text{л.}}$  — межсистемный приток мощности;  $b$  — относительный прирост системы Ленэнерго, задаваемый каждый час.

Программа составлена по блок-схеме, приведенной на рисунке. Вычисления начинаем с выбора таких начальных  $b_{\text{л.}}$  и  $\lambda_i$ , чтобы соответствующая сумма нагрузок электростанций была заведомо меньше заданной, и  $q_i$  было меньше  $q_{i_{\text{эк.}}}$ . Увеличиваем  $b_{\text{л.}}$  на величину  $\Delta b_{\text{л.}}$  до тех пор, пока не получим одно из двух соотношений:

$$1. \sum_{i=1}^m P_i + P_{\text{л.}} = P_c \quad (7)$$

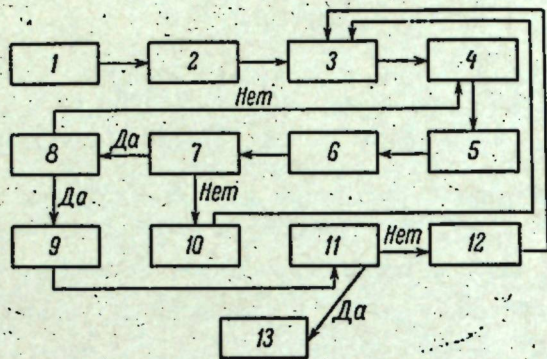


при одновременном выполнении условия (3);

$$2. q_i > q_{i, \text{эк.}}$$

при этом условие (7) еще не соблюдается.

Программа строится так, что при выполнении первого соотношения производится аналогичные расчеты для следующего часа.



Структурная схема программы.

1 — ввод числового материала; 2 — перевод «10 → 2»; 3 — засыл  $\lambda_i, k_i$  в рабочие ячейки; 4 — увеличение  $b_{п.}$ ; 5 — счет  $q_i$ ; 6 — счет  $P_i$ ; 7 — проверка условия  $q_i \approx q_{i, \text{эк.}}$ ; 8 — проверка условия  $\Delta P = 0$ ; 9 — пересыл  $P_i$  в рабочие ячейки; 10 — увеличение соответствующего  $k_i$ ; 11 — проверка условия  $\sum_{j=1}^{24} Q_{ij} = W_i$ ; 12 — изменение  $\lambda_i$ ; 13 — перевод «2 → 10», печать результатов и останов.

Выполнение второго соотношения говорит о том, что на соответствующей ГЭС мощность работающих агрегатов недостаточна. В этом случае расчеты нужно произвести с начала, изменив коэффициент числа агрегатов в выражении, определяющем суммарную мощность данной ГЭС,

$$P_i = k_i f(q_i),$$

где  $k_i$  — некоторое число, большее единицы, которое растет по мере присоединения агрегатов на  $i$ -той ГЭС;  $f(q_i)$  — базисное значение мощности в соответствии с соотношением (4).

Программа должна предусматривать все возможные варианты сочетаний числа работающих агрегатов на всех ГЭС.

После того как соотношение (7) будет выполняться для всех 24 часов, необходимо добиться выполнения равенства (2), которое, вообще говоря, после первого этапа вычислений выполняться не будет. Поэтому необходимо подобрать  $\lambda_i$  таким образом, чтобы наряду с условиями (1), (3), (7) выполнялось условие (2). Делается это следующим образом. Учитывая, что с ростом  $q_i$  растет и расход воды  $Q_i$ , необходимо  $\lambda_i$  увеличить на величину  $\Delta \lambda_i$  в том случае, когда  $\sum_{j=1}^{24} Q_{ij} > W_i$ ,

и уменьшить на величину  $\Delta \lambda_i$ , когда  $\sum_{j=1}^{24} Q_{ij} < W_i$ , после чего все вычисления производятся сначала. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока не будут выполняться условия (1), (2), (3), (7).

Для того чтобы добиться необходимой степени точности,  $\Delta b_{п.}$  и  $\Delta \lambda_i$  можно выбрать, исходя из следующих соображений.

Пусть  $\Delta P$  — максимально допустимая погрешность  $P_c$ , тогда

$$\Delta P \geq \sum_{i=1}^n \Delta P_i + \Delta P_{п.} \quad (8)$$

Из формулы (4) имеем

$$\Delta P_i = \alpha_i \Delta q_i \quad (9)$$

Так как  $q_i \lambda_i = b_{п.}$ , то  $\Delta b_{п.} = \Delta q_i \lambda_i$ , или  $\Delta q_i = \frac{\Delta b_{п.}}{\lambda_i}$ , откуда получим

$$\Delta P_i = \alpha_i \frac{\Delta b_{п.}}{\lambda_i} \quad (10)$$

Исходя из формулы (6), имеем

$$\Delta P_{п.} = \frac{u^2}{2R_{п.}} \Delta \left( 1 - \frac{b}{b_{п.}} \right).$$



Рассмотрим, как будет изменяться выражение в круглых скобках при изменении  $b_{п.}$ :

$$1 - \frac{b}{b_{п.} + \Delta b_{п.}} - 1 + \frac{b}{b_{п.}} = \frac{bb_{п.}}{b_{п.}(b_{п.} + \Delta b_{п.})} < \frac{b\Delta b_{п.}}{b_{п.}^2}.$$

Из сказанного следует, что неравенство (8) будет выполняться при условии

$$\Delta P \geq \sum_{i=1}^m \alpha_i \frac{\Delta b_{п.}}{\lambda_i} + \frac{u^2}{2R_{п.}} \cdot \frac{b\Delta b_{п.}}{b_{п.}^2}. \quad (11)$$

Пусть  $\max \alpha_i = \alpha$ ,  $\min \lambda_i = \lambda$ , тогда можно сказать, что условие (11) выполняется, если

$$\Delta P \geq m \frac{\alpha \Delta b_{п.}}{\lambda} + \frac{u^2}{R_{п.}} \cdot \frac{b\Delta b_{п.}}{b_{п.}^2}. \quad (12)$$

Итак, неравенство (12) будет выполняться, а следовательно, будет выполняться и соотношение (8).

$$\Delta P \geq (m+1) \Delta b_{п.} \max \left( \frac{\alpha}{\lambda}, \frac{u^2 b}{R_{п.} b_{п.}^2} \right),$$

откуда получаем, что

$$\Delta b_{п.} \leq \frac{\Delta P}{(m+1) \max \left( \frac{\alpha}{\lambda}, \frac{u^2 b}{R_{п.} b_{п.}^2} \right)}. \quad (13)$$

Для выбора  $\Delta \lambda$ , воспользуемся следующими соображениями. Исходя из формулы (2), имеем

$$\Delta W_i \geq \sum_{k=1}^{24} \Delta Q_{ik}.$$

Из соотношения (5) можно заключить, что

$$\Delta Q_i \leq \gamma_i \Delta P_i,$$

где  $\gamma_i = \max(\gamma_{i1}, \gamma_{i2}, \dots, \gamma_{i24})$ .

Учитывая это, а также соотношение (9), имеем:

$$\Delta Q_i \leq \alpha_i \gamma_i \Delta q_i,$$

но

$$\Delta q_i \leq \frac{b_{п.} \Delta \lambda_i}{\lambda_i^2},$$

поэтому

$$\Delta Q_i \leq \frac{\alpha_i \gamma_i b_{п.} \Delta \lambda_i}{\lambda_i^2}.$$

Обозначим  $\max \alpha_i = \alpha$ ,  $\max \gamma_i = \gamma$ ,  $\max \Delta W_i = \Delta W$ ,  $\min \lambda_i = \lambda$  и, учитывая, что все  $\Delta \lambda_i$  равны, получим

$$\Delta W \geq 24 \frac{\alpha \gamma b_{п.} \Delta \lambda}{\lambda^2}.$$

Таким образом,

$$\Delta \lambda \leq \frac{\Delta W \lambda^2}{24 \alpha \gamma b_{п.}}.$$

Составленная программа использует всю оперативную память. Дальнейшее же увеличение числа электростанций потребует привлечения внешней памяти. Программа составлена в режиме плавающей запятой, так как предусмотреть все масштабные коэффициенты очень трудно.

#### Литература

1. В. М. Горюштин. Наивыгоднейшие режимы работы гидроэлектростанций в энергетических системах. ГЭИ, М., 1959.
2. Н. А. Качанова, В. В. Умедьян. Программирование для цифровых вычислительных машин расчетов экономического распределения нагрузки в энергосистеме. Электричество, № 9, 1959.
3. А. И. Китов, Н. А. Крицкий. Электронные цифровые машины и программирование. Физматгиз, М., 1961.



## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие . . . . .	3
Н. Г. Зайцев. Моделирующее устройство для расчета характеристики относительных приростов расхода топ- лива тепловой электростанции . . . . .	5
Г. А. Борисов. Вычислительное устройство для расчета и регистрации расходной характеристики парового котла . . . . .	17
Н. Г. Зайцев. Точность, требуемая от автоматических устройств для наимыгоднейшего распределения актив- ных нагрузок в энергосистемах . . . . .	34
Н. Г. Зайцев, А. В. Тяхти. Управляющее устройство, действующее от сигналов точного времени . . . . .	53
Г. В. Воинова, А. С. Ланцман. Экономичное рас- пределение активных нагрузок на ЦВМ «Минск-1» . . . . .	61

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Утверждено к печати  
Карельским филиалом АН СССР

Редактор издательства М. О. Кузьмина. Технический редактор М. Е. Зендель  
Корректоры К. И. Видре, Э. В. Гришина и А. Х. Салтанова

Сдано в набор 6/XII 1963 г. Подписано к печати 24/III 1964 г. РИСО  
АН СССР № 111-121 В. Формат бумаги 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бум. л. 1<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печ. л. 2<sup>1</sup>/<sub>16</sub> =  
=3.48 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 3.31. Изд. № 2107. Тип. зак. № 504. М-27450  
Тираж 2300.

ТП № 1189 1964 г.  
Цена 23 коп.

Ленинградское отделение Издательства «Наука»  
Ленинград, В-164, Менделеевская лпн., д. 1