

В. С. Ермаков, В. С. Каханович, Р. А. Калько, Е. К. Заливако

*(Белорусский филиал Энергетического института
им. Г. М. Кржижановского)*

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ПЕРВИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

При эксплуатации атомных электростанций (АЭС) немаловажное значение имеют вопросы быстрой обработки первичной информации для получения некоторых обобщенных параметров работы станции. Такими параметрами, в частности, являются: выработка тепла реактором (тепловая мощность), к.п.д. энергетической части блока атомный реактор — парогенератор — электрический генератор.

Обработка первичной информации для получения этих параметров производится вручную. Это требует большой затраты труда расчетчиков, снижает точность получаемых результатов, а окончательная информация запаздывает настолько, что становится малоприменимой для повышения экономичности работы эксплуатируемых энергоустановок. Так, например, для определения количества тепла, выработанного водородным атомным реактором типа ВВЭР, необходимо выполнить вручную следующие операции:

- 1) произвести планиметрирование диаграммы температуры питательной воды (теплоносителя);
- 2) определить среднюю температуру питательной воды (теплоносителя);
- 3) по таблицам термодинамических свойств воды определить среднюю энтальпию воды, соответствующую средней температуре;
- 4) произвести планиметрирование диаграммы температуры перегретого пара;
- 5) определить среднюю температуру перегретого пара;
- 6) по таблицам термодинамических свойств пара определить среднюю энтальпию пара, соответствующую средней температуре;
- 7) произвести планиметрирование диаграммы расхода питательной воды (теплоносителя);
- 8) определить поправку к расходу питательной воды (теплоносителя) на отклонение температуры воды от расчетной;
- 9) вычислить действительный расход питательной воды (теплоносителя) с учетом поправки на отклонение температуры;
- 10) вычислить выработку тепла реактором брутто, умножая действительный расход питательной воды (теплоносителя) на разность энтальпий перегретого пара и питательной воды (теплоносителя);
- 11) учесть потери тепла в реакторе для определения тепловой мощности, выделяемой в реакторе.

Рассмотрим некоторые методические вопросы, положенные в основу автоматической обработки первичной информации о работе тепловой схемы применительно к Белоярской атомной электростанции им. И. В. Курчатова и Нововоронежской АЭС.

На рис. 1 представлена принципиальная схема Белоярской АЭС им. И. В. Курчатова [1]. Если пренебречь малозначимыми факторами, коли-

чество тепла Q , вырабатываемое реактором за время $\tau = \tau_1 - \tau_2$, можно выразить в виде

$$Q = \int_{\tau_2}^{\tau_1} q_p d\tau = \int_{\tau_2}^{\tau_1} q_n d\tau - \int_{\tau_2}^{\tau_1} q_b d\tau \text{ дж}, \quad (1)$$

где q_p — тепловая мощность реактора, дж/сек ; q_n — тепловая мощность потока перегретого пара, измеряемого в сечении b (см. рис. 1), дж/сек ; q_b — тепловая мощность потока питательной воды, измеряемого в сечении a (см. рис. 1), дж/сек .

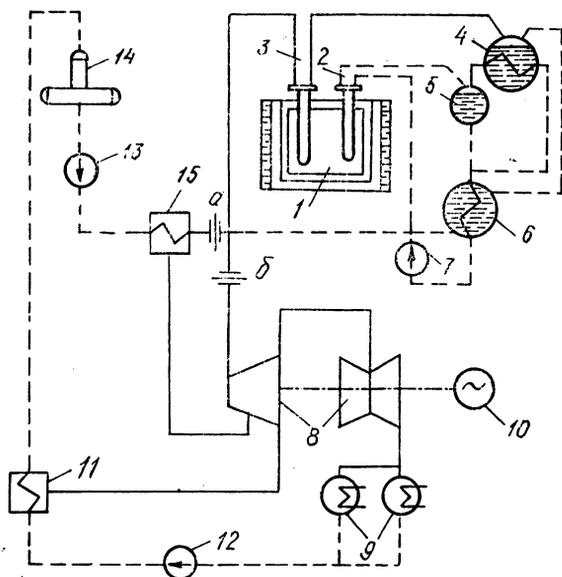


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема Белоярской АЭС им. И. В. Курчатова: 1 — реактор; 2 — рабочий испарительный канал; 3 — рабочий перегревательный канал; 4 — испаритель; 5 — сепаратор; 6 — подогреватель; 7 — циркуляционный насос; 8 — турбина; 9 — конденсаторы; 10 — генератор; 11 — подогреватель низкого давления (ПНД); 12 — конденсатный насос; 13 — питательный насос; 14 — деаэрактор; 15 — подогреватель высокого давления (ПВД); a , b — точки измерения расхода питательной воды и перегретого пара; — вода и пароводяная смесь.

Выражение для тепловой мощности потока пара запишется так:

$$q_n = k \alpha_n \epsilon k_{i_n} d_n^2 i_n \sqrt{h_n \rho_n} \text{ дж/сек}, \quad (2)$$

а тепловая мощность потока питательной воды

$$q_b = k \alpha k_i d_b^2 i_b \sqrt{h \rho} \text{ дж/сек}. \quad (3)$$

Здесь k — постоянный коэффициент; α_n , α — соответственно коэффициенты расхода сужающего устройства в трубопроводах пара и воды; ϵ — поправочный множитель на расширение пара; k_{i_n} , k_i — поправочные множители на тепловое расширение материала сужающих устройств в трубопроводах пара и воды; d_n , d — диаметры сужающих устройств по пару и воде при 20°C , мм; i_n , i_b — энтальпии пара и воды, дж/кг ; h_n , h — перепады давления в сужающих устройствах по пару и воде, н/м^2 ; ρ_n , ρ — плотность пара и воды, кг/м^3 ;

Ввиду ограниченного объема испарителя и сепаратора за сколь угодно значительный промежуток времени существует баланс (равенство) количества питательной воды и перегретого пара:

$$G_n \approx G_b = \int_{\tau_2}^{\tau_1} g_n d\tau = \int_{\tau_2}^{\tau_1} g_b d\tau \text{ кг}, \quad (4)$$

где $G_{\text{п}}$ — количество теплоносителя, проходящего в линии перегретого пара за время $\tau = \tau_1 - \tau_2$, кг; $G_{\text{в}}$ — то же линии питательной воды, кг; $g_{\text{п}}$, $g_{\text{в}}$ — соответствующие расходы теплоносителя, кг/сек.

Уравнение (1) можно переписать с учетом выражений (2) и (3):

$$Q = \int_{\tau_2}^{\tau_1} g_{\text{п}} i_{\text{п}} d\tau - \int_{\tau_2}^{\tau_1} g_{\text{в}} i_{\text{в}} d\tau \approx \int_{\tau_2}^{\tau_1} g_{\text{в}} (i_{\text{п}} - i_{\text{в}}) d\tau =$$

$$= \int_{\tau_2}^{\tau_1} k \alpha k_i d^2 \sqrt{h \rho} (i_{\text{п}} - i_{\text{в}}) d\tau \text{ дж.} \quad (4a)$$

Для возможности реализации в вычислительном приборе уравнение (4) преобразовывается к виду

$$Q = k_1 \int_{\tau_2}^{\tau_1} \sqrt{k_i^2 h \rho (i_{\text{п}} - i_{\text{в}})^2} d\tau, \quad (5)$$

где $k_1 = k \alpha d^2$ — постоянный коэффициент.

Выражение, пропорциональное тепловой мощности реактора, записанное под знаком интеграла уравнения (5), при незначительной методической погрешности моделируется несложной вычислительной схемой, показанной на рис. 2. Здесь значения k_i , ρ , $i_{\text{в}}$ в функции температу-

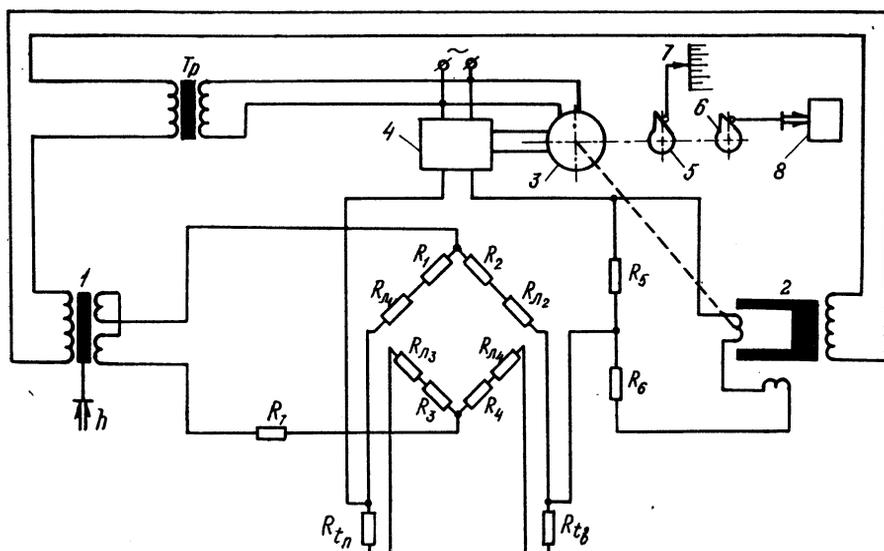


Рис. 2. Принципиальная схема измерения тепловой мощности реактора:
 $R_{\text{л1}}$, $R_{\text{л2}}$, $R_{\text{л3}}$, $R_{\text{л4}}$ — подгоночные сопротивления линий.

ры питательной воды вводятся величиной сопротивления термометра сопротивления $R_{t_{\text{в}}}$, а значение $i_{\text{п}}$ вводится с помощью второго термометра сопротивления $R_{t_{\text{п}}}$.

В данной схеме не учитывается изменение энтальпии пара и воды в зависимости от давления, а также изменение плотности воды в зависимости от давления. Однако это вызывает очень незначительную методическую погрешность. Так, при температуре 500°C и изменении давления перегретого пара в пределах $90 \pm 4 \text{ кгс/см}^2$ [$(88 \pm 4) 10^5 \text{ н/м}^2$] изменение

энтальпии пара не превышает $\pm 0,14\%$ среднего значения, а в расширенной области изменения давления пара $90 \pm 10 \text{ кгс/см}^2 [(88 \pm 10) 10^5 \text{ н/м}^2]$ изменение энтальпии не превышает $\pm 0,35\%$. При температуре 300°C и изменении давления питательной воды в пределах $155 \pm 5 \text{ кгс/см}^2 [(152 \pm 5) 10^5 \text{ н/м}^2]$ изменение энтальпии воды не превышает $\pm 0,03\%$ и плотности — не более $\pm 0,13\%$, а в расширенной области $155 \pm 10 \text{ кгс/см}^2 [(152 \pm 10) 10^5 \text{ н/м}^2]$ — соответственно $\pm 0,06$ и $0,26\%$.

Значения сопротивлений измерительной схемы рис. 2 рассчитываются по специальной методике на ЭЦВМ из расчета обеспечения минимальных и симметричных погрешностей в рабочей области изменения температур перегретого пара и питательной воды. Так, в диапазоне температур перегретого пара $450\text{—}540^\circ\text{C}$ и питательной воды $230\text{—}330^\circ\text{C}$ погрешность моделирования уравнения (5) схемой рис. 2 не превышает $\pm 0,6\%$. В более узкой рабочей области изменения температур погрешность моделирования значительно меньше.

Вычислительный прибор для измерения тепла, вырабатываемого реактором, собирается из стандартных элементов и приборов теплового контроля. В качестве датчика перепада давления h на сужающем устройстве в линии питательной воды используется мембранный дифманометр (ДМ) или любой другой дифманометр с некоторой модификацией схемы рис. 2. Датчиками температуры перегретого пара и питательной воды являются термометры сопротивления стандартной градуировки. В качестве базового измерительного прибора применяется безреохордный мост ферродинамической системы (МФС).

Схема рис. 2 работает следующим образом. Дифференциально-трансформаторный преобразователь дифманометра 1 питает мостовую схему с датчиками температуры, на выходной диагонали которой получается напряжение, пропорциональное квадрату выработки тепла реактором. Это напряжение измеряется компенсационным методом. Компенсирующее напряжение снимается с ферродинамического преобразователя 2 (тип ПФ-4), рамка которого поворачивается реверсивным двигателем (РД) 3. Индикатором разбаланса является электронный усилитель 4, на вход которого подается разность напряжений мостика и преобразователя 2. Управляющая обмотка РД подключена к выходу усилителя. Реверсивный двигатель всегда устанавливает преобразователь ПФ-4 в положение, при котором указанная разность напряжений практически равна нулю.

Таким образом, каждому сочетанию перепада давления на сужающем устройстве в трубопроводе питательной воды и действительных параметров перегретого пара и воды соответствует определенное положение рамки преобразователя ПФ-4 тепломера и, следовательно, определенное положение стрелки и пера. Шкала прибора равномерная.

Извлечение корня из сигнала, образующегося на выходной диагонали мостика, производится с помощью профилированного кулачка 5. Тепломер может быть снабжен выходным частотным преобразователем (ПС), выходная частота которого $4\text{—}8 \text{ кгц}$ является входным сигналом для частотного сумматора (СЧ), выполняющего операцию интегрирования. Класс тепломера — 1,5. Входное декало 6 приводит в действие частотный преобразователь 8. Указатель 7 служит для визуального отсчета показаний прибора по шкале.

Аналогично производится измерение тепла, вырабатываемого реакторами, для других схем АЭС с перегретым паром на входе в турбину. При этом расход и параметры питательной воды (теплоносителя) измеряются за последним подогревателем высокого давления, а температура пара измеряется перед турбиной (как показано на схеме рис. 1).

Для атомных электростанций с двухконтурной схемой и водяным теплоносителем (например, Нововоронежская АЭС [1], первая, вторая и

третья очереди, рис. 3) возникают специфические условия измерения тепла, вырабатываемого реактором. В данном случае возможно измерение в неактивной зоне тепла, вырабатываемого отдельными парогенераторами, без учета потерь в первом контуре:

$$Q = \int_{\tau_2}^{\tau_1} g_{в II} (i_{п II} - i_{в II}) d\tau = \int_{\tau_2}^{\tau_1} q_p d\tau - \int_{\tau_2}^{\tau_1} q_{п} d\tau \text{ дж}, \quad (6)$$

где q_p — расход тепла, полезно вырабатываемого реактором, дж/сек;
 $q_{п}$ — потери тепла в первом контуре, дж/сек.

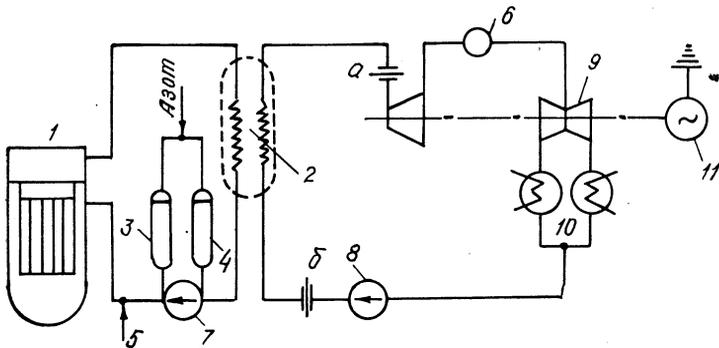


Рис. 3. Принципиальная тепловая схема Новovorонeжской АЭС:
 1 — реактор; 2 — парогенератор; 3, 4 — компенсаторы объема; 5 — подпитка от химводоочистки; 6 — сепаратор; 7 — циркуляционный насос; 8 — конденсатный насос; 9 — турбина; 10 — конденсаторы; 11 — генератор; а, б — точки измерения тепломера ТЭВ-6.

Обозначения с индексом II указывают на принадлежность данного параметра ко второму контуру.

Таким образом, тепломер измеряет тепло, получаемое от парогенератора, которое отличается (с учетом суммирования по отдельным парогенераторам) от вырабатываемого реактором тепла на величину потерь в первых контурах.

Особенностью измерения тепла, вырабатываемого парогенератором, в данном случае является то, что после парогенератора получают обычно насыщенный пар, степень сухости которого не постоянна и изменяется с нагрузкой блока (возможно, и по другим причинам). Изменение влажности пара на 1% влечет за собой изменение вырабатываемого тепла также примерно на 1%. Учет влажности пара затрудняется отсутствием в настоящее время прибора, измеряющего эту величину. Если имеются графики, полученные в результате испытаний, выражающие зависимость влажности пара от нагрузки блока, то ее величину можно учесть при измерении вырабатываемого тепла, введя в схему тепломера ручной задатчик влажности. При наличии автоматического прибора — влагомера — таким задатчиком может служить встроенный выходной преобразователь.

Принцип действия тепломера состоит в непрерывном автоматическом вычислении мгновенной тепловой нагрузки парогенератора по сигналам датчиков перепада давления на сужающем устройстве, температуры питательной воды и влажности острого пара. Следовательно, тепломер представляет собой специализированное аналоговое вычислительное устройство, которое работает по принципу автоматической компенсации.

Тепломер решает уравнение

$$q_{II} = k \sqrt{h(x - k_1) \frac{a - t_{п.в}}{b + t_{п.в}}} \text{ ед, тепла/ед. времени,} \quad (7)$$

где h — текущее значение перепада давления на сужающем устройстве (СУ); k — постоянный градуировочный коэффициент; x — степень сухости острого пара; $t_{п.в}$ — температура питательной воды; a, b, k_1 — постоянные коэффициенты.

Для параметров пара $p_0 = (22 - 32) \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$, $x = 1 - 0,98$; воды $t_{п.в} = 130 - 190^\circ\text{C}$, $p_{п.в} = 36 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ постоянные коэффициенты формулы (7) имеют следующие значения: $k_1 = 0,3992$; $a = 110,70$; $b = 480,86$; $k = 0,01252 \text{ ад}_{20}^2 \cdot 10^3 \sqrt{604,38}$ — для часового расхода. Если применять, например, термометр 21-й градуировки, то формула (7) принимает вид

$$q_{II} = k \sqrt{h(x - 0,3992) \frac{110,70 - R_t}{480,86 + R_t}}, \quad (8)$$

где R_t — значение сопротивления термометра при соответствующей температуре. Методическая погрешность формулы (8) $\delta = \pm 0,06\%$. Максимальная дополнительная погрешность от неучета давления питательной воды в диапазоне от $28 \cdot 10^5$ до $38 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2$ не превышает $0,1\%$, а от неучета давления (температуры) пара — не более $0,15\%$. Результирующая методическая погрешность с учетом случайного характера изменения параметров воды и пара составит $0,2\%$.

Приведенный анализ погрешностей показывает, что нет необходимости в измерении давления воды и пара, так как при этом значительные затраты не будут оправданы незначительным увеличением точности.

Принципиальная схема тепломера ТЭВ-6 представлена на рис. 4. Пунктирные линии показывают подключение устройств для учета влажности пара. Прибор, измеряющий влажность пара, снабжается выходным ферродинамическим преобразователем 11 типа ПФ-4. Угол поворота его рамки пропорционален величине x . С помощью делителя и обмотки смещения его выходная характеристика настраивается так, чтобы выходное напряжение было пропорционально величине $(x - k_1)$. Это напряжение поступает на вход повторителя электрических сигналов (ПЭС) 10. Выходным током повторителя питаются обмотки возбуждения преобразователя дифманометра 1 и преобразователя обратной связи 2 (перемычки с клемм a, a_1 и b, b_1 удалены), причем в цепь обратной связи повторителя включена только рамка преобразователя 2, зафиксированная на максимальном угле поворота, а его обмотка смещения служит для настройки характеристики преобразователя 1 и регулировки «нуля» в процессе эксплуатации.

Мост, содержащий термометр сопротивления $R_{t_{пв}}$ питается напряжением, пропорциональным $(x - k_1)$. Напряжение на измерительной диагонали моста пропорционально величине квадрата расхода тепла:

$$U = q_{II}^2 = (x - k_1) \frac{a - R_t}{b + R_t} h. \quad (8a)$$

Это напряжение измеряется автокомпенсационным способом. Результирующий сигнал подается на вход усилителя 4. Резистором R_6 устанавливается верхний предел измерения. Таким образом, угол поворота α рамки компенсирующего преобразователя 3 (ПФ-4) и, следовательно, вала двигателя 5 будет пропорционален q_{II}^2 . Закон перемещения

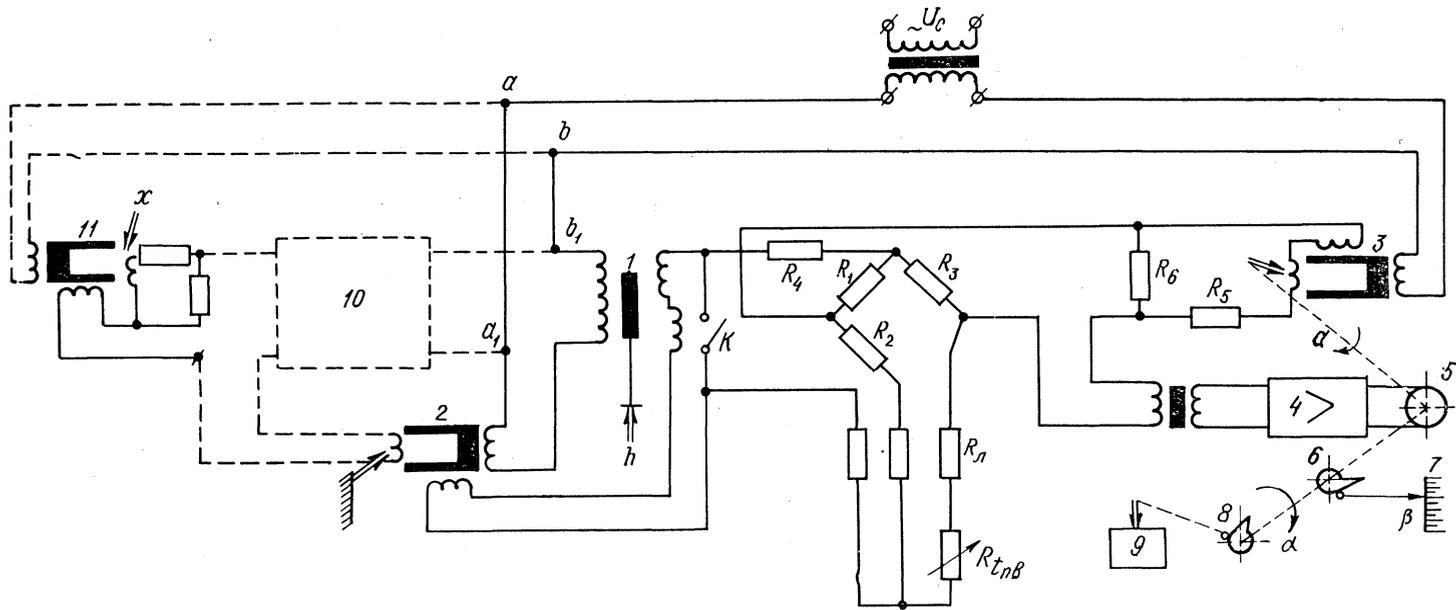


Рис. 4. Принципиальная схема тепломера ТВ-6.

указателя (регистратора) 7 задается функциональным лекалом 6, профиль которого выбирается так, что

$$\beta = k \sqrt{h(x - k_1) \frac{a - R_t}{b + R_t}}. \quad (86)$$

Индикатором разбаланса служит электронный усилитель на полупроводниковых триодах. Тумблером K задается режим контроля «нуля» прибора. Выходной преобразователь 9 кинематически связан с валом двигателя через кулачок 8, с помощью которого может быть задана желаемая функциональная зависимость выходного сигнала от величины q_{11} . Тепломер, выполненный по схеме рис. 4, установлен на Нововоронежской АЭС в 1970 г. Основная погрешность прибора $\leq \pm 1\%$.

Разработаны вычислительные приборы для измерения тепловой мощности потока перегретого пара в соответствии с уравнением (2) и тепловой мощностью потока горячей воды в соответствии с уравнением (3). Эти приборы также могут найти применение на АЭС (класс — 1,5 [2]).

Измерение к.п.д. энергетического атомного блока может производиться по способу, описываемому уравнением

$$\eta = \frac{\int_{\tau_2}^{\tau_1} N d\tau}{(k_1 \int_{\tau_2}^{\tau_1} \sqrt{k_t^2 h \rho (i_n - i_b)^2} d\tau)_{\text{const}}} = \frac{\int_{\tau_2}^{\tau_1} N d\tau}{(\int_{\tau_2}^{\tau_1} q_p d\tau)_{\text{const}}} = k_2 \int_{\tau_2}^{\tau_1} N d\tau, \quad (9)$$

где N — электрическая мощность генератора, $вт$; q_p — тепловая мощность реактора, $дж/сек$; k_2 — постоянный коэффициент:

$$k_2 = \frac{1}{(k_1 \int_{\tau_2}^{\tau_1} \sqrt{k_t^2 h \rho (i_n - i_b)^2} d\tau)_{\text{const}}} = \frac{1}{(\int_{\tau_2}^{\tau_1} q_p d\tau)_{\text{const}}}. \quad (10)$$

Сущность способа заключается в том, что измеряется количество выработанной генератором электроэнергии ($\int_{\tau_2}^{\tau_1} N d\tau$) за время расхода постоянного количества тепла, вырабатываемого реактором. При этом количество выработанной электроэнергии оказывается пропорциональным к.п.д. блока. Цикл времени ($\tau_1 - \tau_2$), за которое реактором вырабатывается постоянное количество тепла, будет изменяться в процессе измерения к.п.д. в соответствии с изменением нагрузки атомного энергетического блока. При малой нагрузке реактора цикл времени ($\tau_1 - \tau_2$) больший, а при больших нагрузках цикл уменьшается.

Переменный цикл времени измерения к.п.д. имеет преимущества по сравнению с постоянным циклом в применявшемся ранее методе измерения к.п.д. Так, например, среднее значение к.п.д. атомного энергоблока за длительный промежуток времени при переменном цикле измерения к.п.д. по предложенному методу может быть легко определено как среднее арифметическое из значений единичных замеров к.п.д. $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$:

$$\eta_{\text{ср}} = \frac{\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \dots + \eta_n}{n}. \quad (11)$$

Блок-схема измерения к.п.д. по предлагаемому способу представлена на рис. 5. В качестве интегратора тепловой мощности реактора ис-

пользуется описанный выше вычислительный прибор для измерения вырабатываемого реактором тепла. В качестве интегратора электрической мощности генератора используется электрический счетчик вырабатываемой генератором энергии с фотоимпульсной приставкой или с автогенераторным бесконтактным датчиком, разработанный в Белорусском филиале ЭНИНа, или электрический счетчик серийного производства.

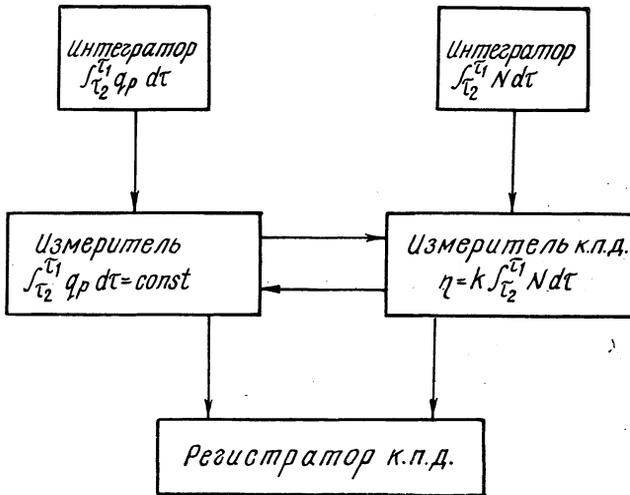


Рис. 5. Блок-схема измерения к.п.д. ядерного энергоблока.

Измерителем расхода постоянного количества тепла может служить пересчетная схема на двоичных элементах, воспринимающая импульсы от интегратора выработки тепла. При накоплении постоянного количества импульсов пересчетная схема выдает сигнал для регистрации с помощью регистратора к.п.д. количества импульсов, накопленных измерителем к.п.д. После регистрации к.п.д. показания измерителя к.п.д. гасятся в нуль и цикл измерения повторяется.

Измеритель к.п.д. представляет собой двоичный или десятичный счетчик импульсов, поступающих от интегратора мощности генератора, т. е. электрического счетчика энергии. Регистратором к.п.д. служит любое электромеханическое или иное устройство, которое по команде измерителя постоянного количества расхода тепла, вырабатываемого реактором, регистрирует число импульсов, накопленных измерителем к.п.д.

Разработанные методы и аппаратура позволяют:

- а) автоматизировать наиболее трудоемкие повседневные расчетные операции;
- б) повысить точность измерений;
- в) сократить численность персонала расчетных групп и улучшить условия их работы за счет исключения однообразной работы по планированию диаграмм измерительных приборов, введению поправок и производству трудоемких расчетов;
- г) повысить экономичность работы эксплуатируемых установок за счет введения режима по уточненной информации, оперативно получаемой от вычислительных устройств.

Предложенные алгоритмы могут также использоваться в информационных и управляющих машинах для расчета рассмотренных в статье обобщенных параметров.

Литература

1. Маргулова Т. Х. Атомные электрические станции. М., 1969.
2. Каханович В. С. Измерение расхода вещества и тепла при переменных параметрах. М., 1970.