

ВЫБОР УСТАВОК ПО НАПРЯЖЕНИЮ, ЧАСТОТЕ И ВРЕМЕНИ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ТЭЦ

Аспирант В. И. СТАРОСТИН

В настоящее время происходит процесс слияния отдельных энергосистем в объединенные. Во многих случаях энергосистемы соединяются между собой слабыми межсистемными связями. При отсутствии магистральных межсистемных линий напряжением 400—500 кВ такими связями, как правило, являются 2 цепные линии электропередачи 110 кВ, питающие подстанции электрифицированной железной дороги. В этом случае потоки обменной мощности между энергосистемами представляют относительно малую величину, так как их предел определяется запасом статической устойчивости.

Изменение межсистемных перетоков, нерегулярные колебания, вызываемые тяговой нагрузкой, отключение больших генерирующих мощностей, набросы больших нагрузок могут приводить к нарушению статической устойчивости и, как следствие, к глубокой посадке напряжения и частоты. Статистика показывает, что в течение 1960—1962 г. только в объединенной энергосистеме Западной Сибири зарегистрировано 26 случаев нарушения устойчивости межсистемных электропередач [1].

На исследуемой ТЭЦ энергосистемы от нарушения статической устойчивости и резкого снижения напряжения и частоты неоднократно создавались режимы, один из которых привел ТЭЦ к полной остановке. Процесс колебания частоты и напряжения при их общем снижении в сильной степени оказывает влияние на работу механизмов собственных нужд и прежде всего на работу питательных электронасосов. Это объясняется тем, что они имеют вентиляторный момент сопротивления и работают с большим противодавлением.

Современные котлоагрегаты высокого давления с малым объемом барабана, работающие совместно с электропитательными насосами 5Ц-10 или другими насосами высокого давления, даже при небольшой потере производительности насосов, вызванной уменьшением числа оборотов, через несколько минут должны быть отключены от паропроводов при достижении предельного нижнего уровня воды в барабанах котлов.

Таким образом, вопрос об автоматических делительных устройствах (АДУ) в схеме электрических соединений должен приобретать немаловажное значение и расцениваться, как мероприятие по повышению надежности работы энергосистем.

К существующим на ряде электростанций АДУ должны быть предъявлены следующие требования:

1. АДУ должно автоматически выделять генератор или несколько генераторов на шины собственных нужд и отдельные потребительские блоки для их независимой работы от сети.

2. Время срабатывания АДУ должно быть таким, чтобы оно не приходило в действие от нарушения режимов работы системы, не угрожающих отключению котлоагрегатов и, срабатывало раньше, чем котлоагрегаты должны быть отключены вследствие потери производительности питательных электронасосов.

3. АДУ должно быть надежным, простым в эксплуатации и наладке и обладать универсальностью.

Уместно заметить, что мгновенная подача командного импульса на срабатывание АДУ при аварийных режимах недопустима по тем соображениям, что всякое отделение генераторов связано с нарушением существующего баланса активных и реактивных мощностей, что ставит оставшуюся систему в еще более тяжелые условия. Кроме этого, увеличивается реальная возможность отказа какой-либо цепи управления выключателями, принимая во внимание большую ответственность и ответственность цепей АДУ.

На практике были такие случаи, когда нарушение режима работы энергосистемы восстанавливалось быстрее, чем задана уставка по времени АДУ и поэтому ненужное срабатывание предотвращалось.

Поскольку персонал электростанций и Ц. С. РЗАИ испытывают затруднения в вопросе выбора уставок по напряжению, частоте и времени для АДУ, в этой статье предлагается принципиально новый метод выбора, учитывающий режимы работы электрической схемы и тепломеханического оборудования собственных нужд электростанций. При выборе уставок в основу анализа положен графоаналитический расчет для конкретной типовой ТЭЦ высокого давления и может быть использован для других аналогичных ТЭЦ. Для электростанций, имеющих отличные от расчетных режимы, другое оборудование, схему и компоновку, можно пользоваться методом расчета.

Для анализа работы питательной установки совместно с котлоагрегатами предварительно следует решить две задачи:

1. Определить вращающие моменты электродвигателя питательной установки при номинальных параметрах и при сниженных значениях напряжения и частоты.

2. Определить моменты сопротивления питательного насоса в зависимости от числа оборотов.

Определение вращающих моментов электродвигателя АТМ-2000-2 и моментов сопротивления насоса 5Ц-10

На ТЭЦ высокого давления в качестве привода к питательным насосам 5Ц-10 преимущественное распространение получил электродвигатель типа АТМ-2000-2, 2000 *квт*, 3000 6000 *в*, 2980 *об/мин*. 460/230 *а*.

Этот электродвигатель имеет два исполнения: фирмы «Саксенверк» (ГДР) и Новосибирского турбогенераторного завода (НТГЗ). Характеристики электродвигателей обеих исполнений почти совпадают, что приводит к одинаковым электромагнитным вращающим моментам в пределах от скольжения $S=0$ до критического $S=S_k$ (устойчивая часть характеристики). Так как при расчете значения вращающих моментов требуются только в пределах этого диапазона сколь-

жений, то в этом случае их можно считать однотипными, не принимая во внимание некоторое различие в пусковой характеристике. Построение основной характеристики $M=f(S)$ производится на основании каталожных данных и заводских испытаний в режимах холостого хода и короткого замыкания. Следует заметить, что нахождение приведенного активного сопротивления ротора и индуктивных сопротивлений ротора и статора по методу, предложенному И. А. Сыромятниковым [2], при двух значениях скольжения $S=0$ и $S=1$ значительно точнее по сравнению с другими известными методами. Особенно это относится к электродвигателям серии АТМ, которые имеют небольшие рабочие скольжения и обладают целым рядом особенностей (явление насыщения и вытеснения тока в клетке ротора, влияние магнитного бандажа).

Расчет кривых $M=f(S)$ выполнен для номинальных значений фазового напряжения и частоты, пониженных значений напряжения ($0,9U_n, 0,8U_n, 0,7U_n$) и номинальной частоты, пониженных значений частоты 49, 48, 47, 45 гц и номинального напряжения и, наконец, для наиболее часто встречающегося случая, когда одновременно снижаются напряжение и частота и так, что $\frac{U}{f} = \text{const}$. При определении этой зависимости можно воспользоваться упрощенной формулой кратности вращающего момента к номинальному

$$m = \frac{M}{M_n} = \frac{2b_n \cdot \frac{K_u^2}{K_f^2}}{\frac{S_k}{K_f S} + \frac{K_f S}{S_k}} \quad (1)$$

$$K_f = \frac{f}{f_n} \quad \text{— кратность частоты;}$$

$$K_u = \frac{U}{U_n} \quad \text{— кратность напряжения;}$$

b_n — кратность максимального момента, определенная графически по кривой $M=f(S)$ при номинальном напряжении и частоте;

S_k — критическое скольжение, определяемое графически для номинального режима или по формуле:

$$S_k = \frac{G_1 R_{20}^1}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + C_1 X_1^2)^2}} \quad (2)$$

На рис. 1 представлена серия кривых $M=f(S)$ при номинальных и пониженных значениях напряжения и частоты. Для возможности исследования режимов пуска резервных насосов, кроме этих напряжений принято фазовое напряжение, равное $0,925 U_n$, т. е. 3210 в, которому соответствует пропорциональное снижение частоты 46,25 гц.

Для определения моментов сопротивления насоса при различном числе оборотов необходимо произвести расчет режимов работы питательной установки. На исследуемой ТЭЦ установлено 10 котлоагрегатов типа ТП-230 с номинальной производительностью 230 т/ч, номинальным давлением в барабане 110 ата и температурой перегретого пара 510°. Питательная установка состоит из 9 питательных электронасосов типа 5Ц-10, гарантийной производительностью 270 м³/ч и

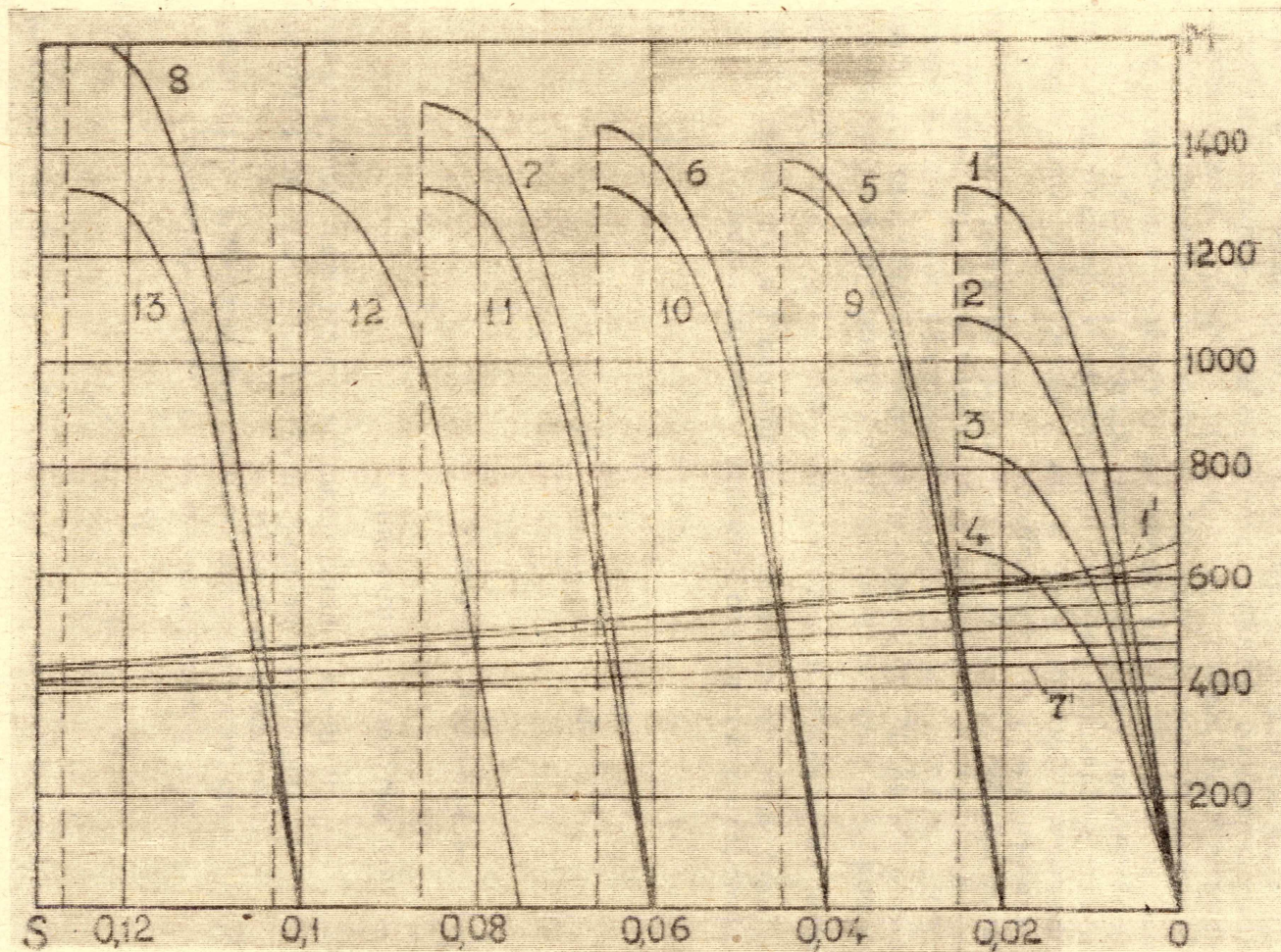


Рис. 1. Зависимость вращающего момента двигателя АТМ-2000-2 и момента сопротивления насоса 5Ц-10 от скольжения при различном значении частоты и напряжения: кривая 1— I_n ; 2— $0.9 I_n$; 3— $0.8 I_n$; 4— $0.7 I_n$; 5—49 гц, I_n ; 6—48 гц, I_n ; 7—47 гц, I_n ; 8—45 гц, I_n ; 9—49 гц, 3400 в; 10—48 гц, 3330 в; 11—47 гц, 3260 в; 12—46,25 гц, 3210 в; 13—45 гц; 3120 в; 1'—7'—353, 334, 300, 260, 220, 180, 140 т/ч.

развиваемым напором 1570 м в с. Минимальное давление в питательной магистрали 130 атм. Температура питательной воды в насосе 158°.

Питательная установка в нормальном режиме работает по рациональному графику, выбор числа рабочих насосов в котором сводится к выявлению для различных расходов питательной воды режимов работы питательных электронасосов с минимальной затратой электроэнергии на их привод.

Расчетными режимами питательной установки принимаются: минимальный — производительность одного насоса 140 т/ч; максимальный — производительность одного насоса 334 т/ч. Максимальный, наиболее тяжелый, режим фиксируется по материалам технического отдела и, как правило, совпадает с одним из последних месяцев года.

Такой режим имел место в декабре, когда на станции работали все 10 котлоагрегатов с суммарной производительностью 1910 т/ч. В этом случае, принимая во внимание 5% непрерывную продувку, количество перекачиваемой воды составит 2012 т/ч.

Для такого количества питательной воды, на основании рационального графика работало 6 насосов, каждый с производительностью 334 т/ч.

В основу расчета работы питательной установки при нарушениях режима от понижения частоты и напряжения положен график зависимости напора, мощности, КПД насоса от расхода питательной воды. Характеристики насосов взяты, с одной стороны, по заводским характеристикам 5Ц-10, прошедшего стендовые испытания и, с другой стороны, по материалам испытаний такого же насоса, имеющего наименьший КПД. По данным этих испытаний и построены усредненные характеристики $Q-H$, $Q-P_2$, $Q-\eta$, показанные на рис. 2 жирными линиями. Следовательно, выбранные усредненные характеристики между насосами с высоким и низким КПД отражают работу всей питательной установки и согласуются с усредненными характеристиками, полученными ОРГРЭС при испытании насосов 5Ц-10 на ряде электростанций [3].

Построение характеристик для различного числа оборотов насоса производится по формулам пропорциональности:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1}; \quad \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2; \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$$

Эти семейства характеристик показаны на рис. 2. Дать полную характеристику работе питательных насосов можно только тогда, когда известна характеристика питательной сети. Рабочий напор, развиваемый насосом, состоит из статического и динамического и выражается уравнением:

$$H = H_{ст} + H_{дин} \quad (3)$$

Высота от оси насоса до уровня воды в барабане равна 28 мт, а до уровня воды в деаэраторе 6 ата 20 мт, тогда

$$h_1\gamma = 28 \cdot 0,91 = 25,5 \text{ мвс}; \quad h_2\gamma = 20 \cdot 0,91 = 18,2 \text{ мвс}$$

где γ — плотность воды в т/м³.

$$H_{ст} = 1090 + 25,5 - 50 - 18,2 = 1047 \text{ мвс}$$

Динамический напор, характеризующий собою сопротивление сети, зависит от степени открытия питательного клапана при неизменном состоянии другой арматуры питательного тракта. Степень открытия питательного клапана, управляемого электронным автоматом, опре-

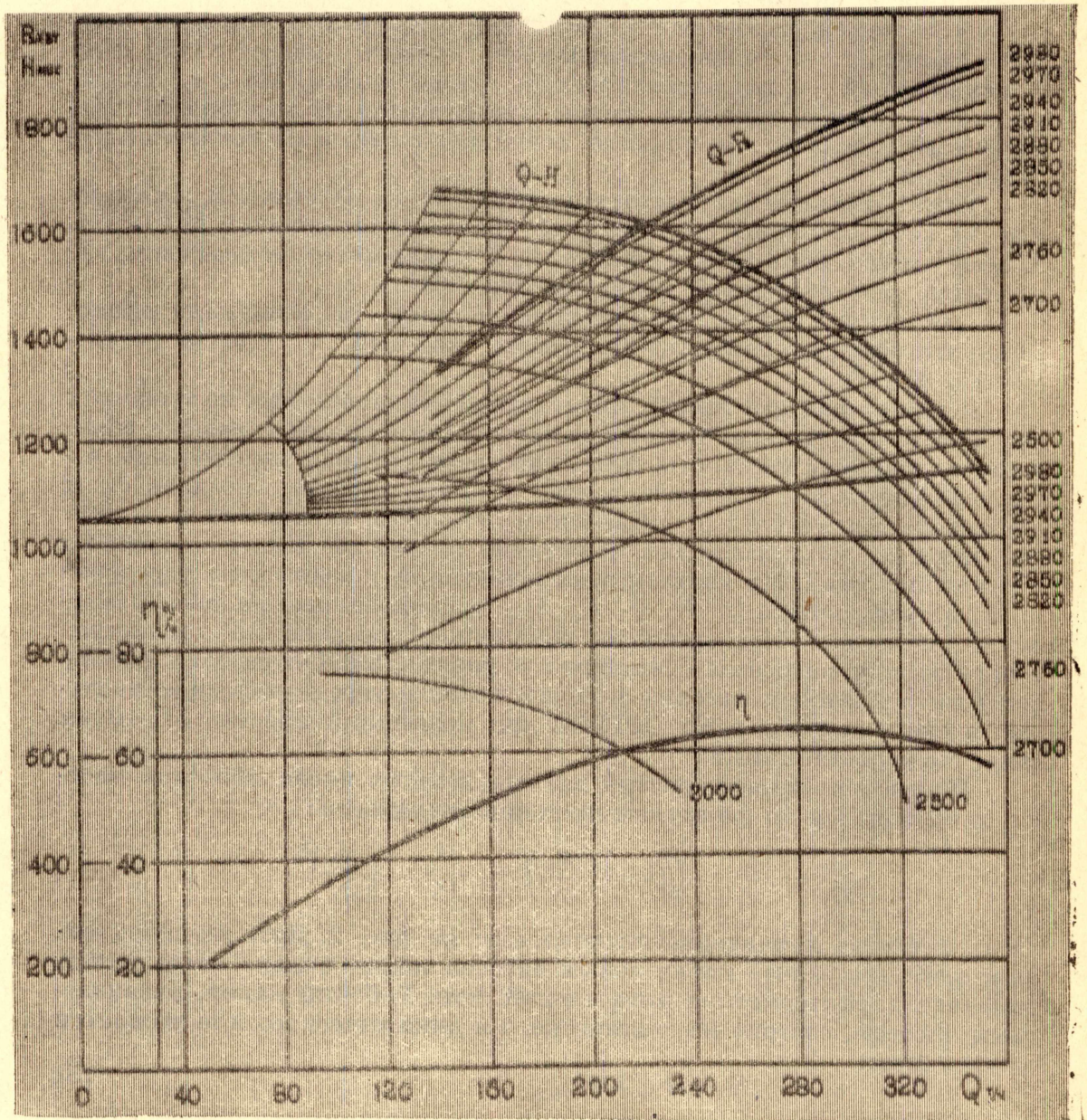


Рис. 2. Зависимость напора, мощности и КПД от производительности питательного насоса при различных числах оборотов.

деляется производительностью, необходимой для поддержания постоянства уровня воды в барабане котла. Для определения характеристики сети при полностью открытом питательном клапане выбирается исходная точка основной характеристики $Q-H$ при давлении в питательной сети 120 ати. На это давление выполнена установка пуска резервных насосов. Если давление в сети будет ниже 120 ати подача воды в котлы практически прекращается. Соответственно этому развиваемый напор будет равен 1132 мвс.

В этом случае пропускная способность питательного клапана наибольшая и определяется по кривой $Q-H$ производительностью 353 т/ч. Тогда динамический напор:

$$H_{\text{дин}} = H - H_{\text{ст}} = 1132 - 1047 = 85 \text{ мвс.}$$

Для этой степени открытия питательного клапана напор при любой заданной производительности насоса подсчитывается по формуле:

$$H = H_{\text{ст}} + H_{\text{дин}} \left(\frac{Q}{Q_{353}} \right)^2 \text{ мвс.}$$

Для степени открытия питательного клапана, соответствующей другой производительности, напор, развиваемый насосом и динамический напор определяются аналогично. На рис. 2 представлена серия параболических кривых, характеризующая собой сеть при различной степени открытия питательного клапана. Эти кривые исходят из точки статического напора и заканчиваются на основной характеристике $Q-H$.

По характеристикам насоса и сети строится график зависимости моментов сопротивления от числа оборотов:

$$M = 0,975 \frac{P_2}{n} 10^3 \text{ кгм} \quad (4)$$

$$P_2 = \frac{Q \cdot H}{102 \cdot 3600 \eta} 10^3 \text{ квт.} \quad (5)$$

Полезную мощность на валу можно определить не только расчетным путем, а по кривым $Q-P_2$ для различного числа оборотов. При уменьшении числа оборотов и предельной степени открытия питательного клапана произойдет уменьшение производительности до величины, которая определится точкой пересечения скоростной характеристики с характеристикой сети. Для меньших значений степени открытия питательного клапана, определяемой производительностью в пределах от 140 до 353 т/ч, расчет производится подобным же порядком и кривые моментов сопротивления наносятся на рис. 1. Точка пересечения кривой вращающего момента и момента сопротивления определяет число оборотов, при котором обеспечивается определенная производительность насоса.

Пользуясь рис. 2, можно построить график зависимости производительности от числа оборотов. Построение производится с учетом предельной производительности 353 т/ч по точкам пересечения скоростных характеристик $Q-H$ с характеристикой сети. При уменьшении числа оборотов насоса ниже номинального потери производительности не произойдет до того значения числа оборотов, которому соответствует точка пересечения характеристики сети при полностью открытом питательном клапане со скоростной характеристикой $Q-H$. В этом случае питательный клапан начнет открываться до своего предельного значения. При дальнейшем снижении числа оборотов

производительность начнет уменьшаться. Эта зависимость представлена на рис. 3.

Анализировать процессы, происходящие в питательной установке, можно после того, как будет определен вес воды цилиндрического слоя в барабане котла.

Длина барабана котла ТП-230 11200 мм

Внутренний диаметр барабана 1300 мм

Нормальный уровень зеркала испарения ниже на 50 мм от диаметра барабана. Предельный нижний уровень ниже на 180 мм от диаметра. Производя необходимые вычисления, определим объем воды этого слоя, равного 2,88 м³. При $t=316^\circ$ и $\gamma=0,666$ т/м³, вес воды цилиндрического слоя составит: $G = V \cdot \gamma = 2,88 \cdot 0,666 = 1,52$ т.

Зависимость изменения расхода питательной воды от снижения числа оборотов турбин

Эксплуатационные характеристики паровых турбин электростанций рассчитываются, исходя из нормального числа оборотов, соответствующего стандартной частоте 50 гц. Выбранный диапазон изменения частоты 50—45 гц определяет собой изменение числа оборотов турбин от 3000 до 2700 об/мин. и на такое уменьшение числа оборотов непосредственно из характеристик регулирования невозможно дать ответ на изменение расхода пара, а следовательно и питательной воды. При анализе этой зависимости предполагается, что тепловая нагрузка внешних потребителей и с/н неизменная и теплофикационные турбины, имеющие отборы, рассматриваются, как работающие по конденсационному режиму.

Увеличение расхода пара турбинами при снижении числа оборотов происходит по двум причинам:

1. За счет увеличения степени открытия регулирующих клапанов турбин.
2. В результате ухудшения КПД турбин

При снижении числа оборотов турбин их система регулирования воздействует на открытие регулирующих клапанов, благодаря чему расход пара увеличивается. Характер увеличения расхода пара принят по материалам заводских испытаний систем регулирования различных типов турбин, устанавливаемых на исследуемой ТЭЦ. На рис. 4 показана зависимость хода сервомотора ЧВД от числа оборотов ротора турбины ВПТ-25-3 [4]. Как видно из графика, эта зависимость выражается уравнением прямой, не проходящей через начало координат.

$$n = KX + n_0 \quad (6)$$

где n_0 — постоянная величина, равная 3171 об/мин;

$K = \operatorname{tg} \varphi$ — тангенс угла наклона, равный $-1,8$;

X — ход сервомотора в м. м.

n — число оборотов, при котором определяется ход сервомотора.

Для построения зависимости расход пара турбиной от числа оборотов необходимо знать долю потребления пара, приходящуюся на турбину данного типа. При общей паропроизводительности 1910 т/ч всех 10 котлоагрегатов потребление пара турбинами составит:

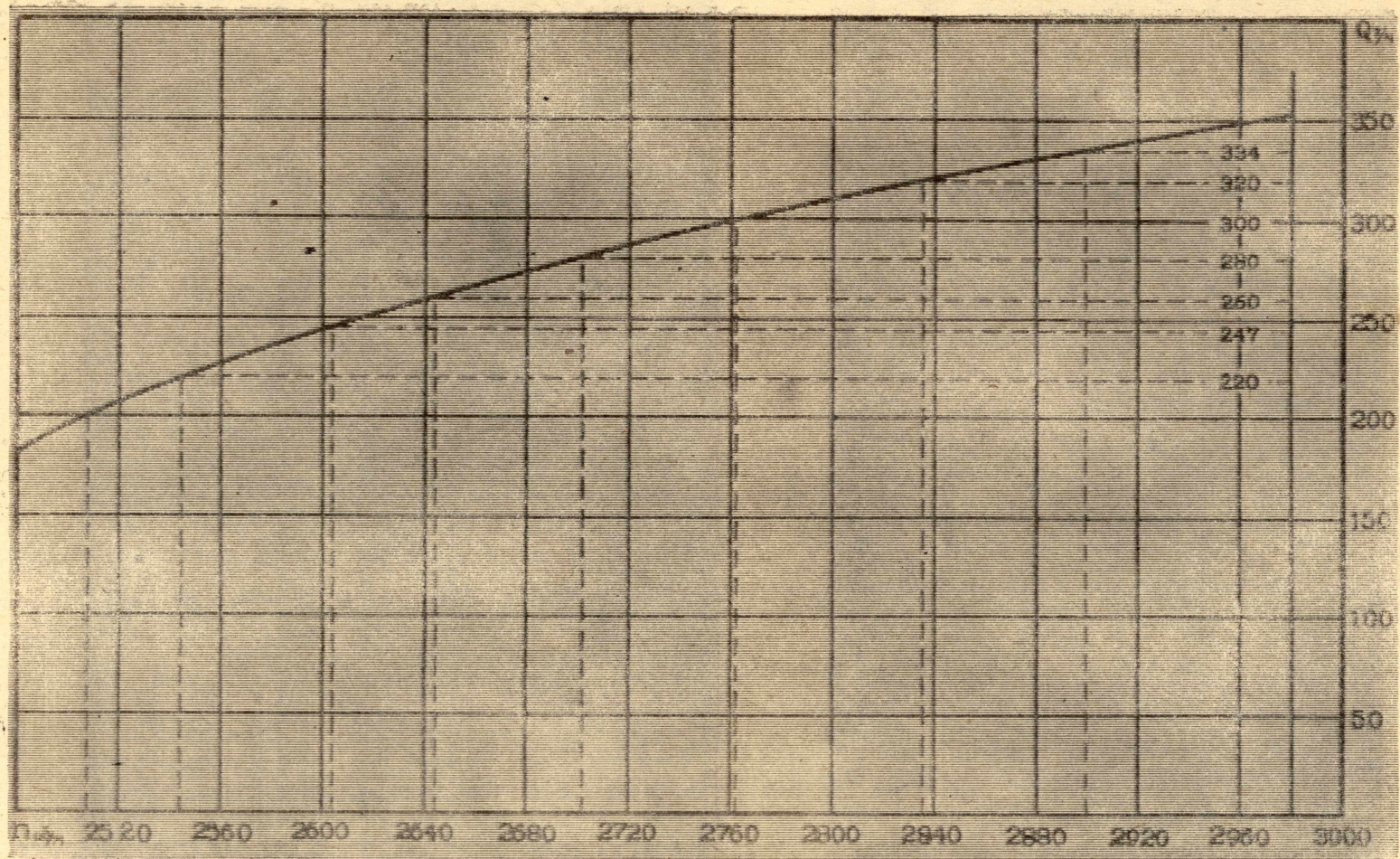


Рис. 3. Зависимость производительности от числа оборотов питательного насоса.

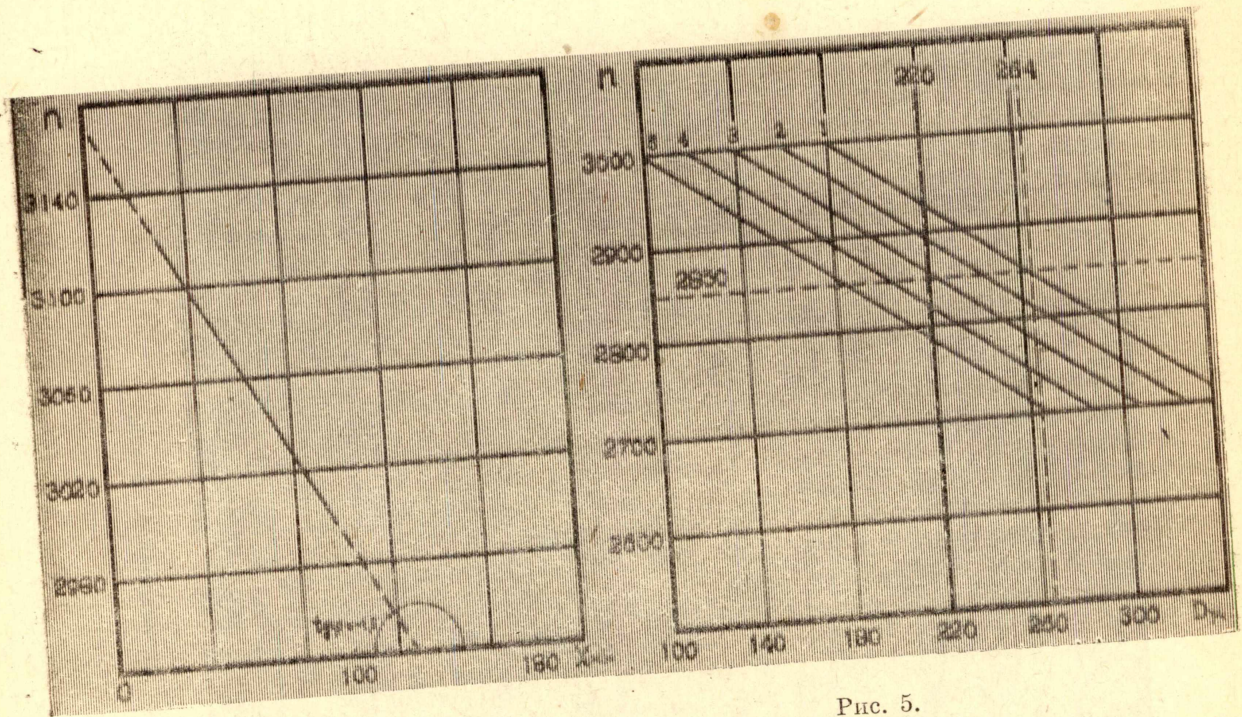


Рис. 4.

Рис. 5.

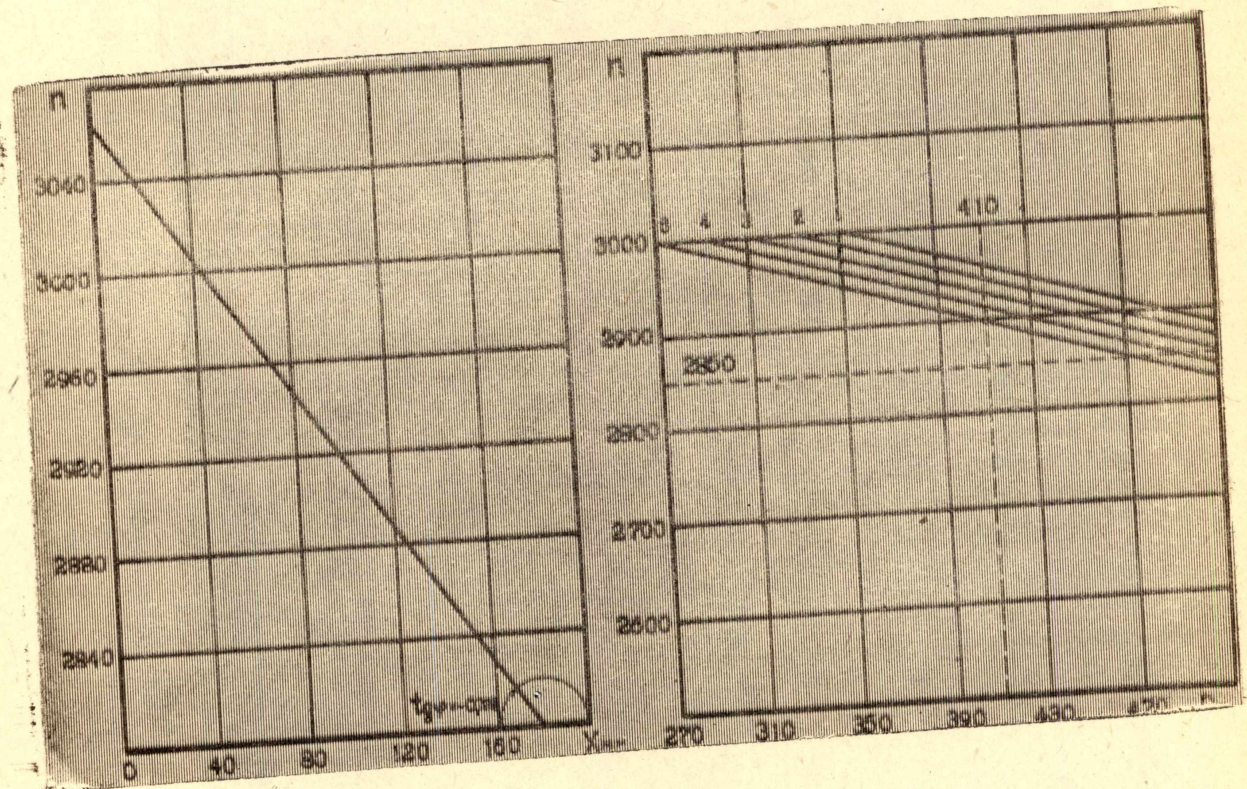


Рис. 6.

Рис. 7.

ВПТ-50-2	350 т/ч·1=350 т/ч
ВПТ-25-3	180 т/ч·4=720 т/ч
ВР-25	280 т/ч·3=840 т/ч
Итого:	1910 т/ч

Для других значений суммарного паросъема, произойдет пропорциональное распределение паровой нагрузки по турбоагрегатам. Так как ход сервомотора ЧВД имеет линейную зависимость от числа оборотов турбины и определяется тангенсом наклона прямой, поэтому и зависимость расхода пара от числа оборотов ротора будет представлять собой также прямую, для которой справедливо линейное уравнение:

$$D = \frac{n - n_1}{K} + D_1 \quad (\text{т/ч}) \quad (7)$$

- D — определяемый расход пара при различных числах оборотов ротора;
 D_1 — расход пара при номинальном числе оборотов;
 n_1 — число оборотов ротора при номинальной частоте;
 n — число оборотов ротора, при котором определяется расход пара.

На рис. 5 эта зависимость выражена прямой 1. Если первоначальная паровая нагрузка турбины отличается от значений, указанных выше, то пользуясь уравнением (7), можно получить серию параллельных прямых или статических характеристик, смещение которых определяется ходом сервомотора. Исходя из этого прямые 2, 3, 4, 5 построены для первоначальной нагрузки турбины ВПТ-25-3 соответственно: 160, 140, 120, 100 т/ч.

Для турбины ВПТ-50-2 эти же зависимости определяются аналогично на основании материалов заводских испытаний [5] и показаны на рис. 6 и 7. Для паровых турбин предел регулирующей способности клапанов определяется степенью неравномерности регулирования, равной:

$$\delta = 4\% \pm 1\%$$

$$\delta = \frac{n_1 - n}{n}; \quad n = n_1(1 - \delta) = 3000 \cdot 0,95 = 2850 \text{ об/мин.}$$

При этом числе оборотов регулирующие клапаны полностью откроются и при дальнейшем снижении оборотов расход пара не увеличится. На рис. 5 этот предел показан для турбины ВПТ-25-3 вертикальной секущей и при этом расход пара составит 264 т/ч при первоначальной паровой нагрузке 180 т/ч.

Кроме регулирующей способности клапанов, расход пара турбиной ограничивается пропускной способностью клапанов регулирования и паропроводов. Она для турбин ВПТ-25-3 составляет 220 т/ч, а для ВПТ-50-2 — 410 т/ч [6].

Таким образом, при числе оборотов турбины ВПТ-25-3 ниже 2930 об/мин. и паровой нагрузке 180 т/ч расход пара будет постоянным и предельным.

Для турбины ВПТ-50-2 этот предельный расход пара наступит при 2955 об/мин. и ниже, если первоначальная паровая нагрузка составляла 350 т/ч. В связи с этим уместно отметить следующую особенность. Исследование аварийных режимов от понижения частоты с использованием показаний самопишущих приборов, регистрирующих расход пара турбинами, частоту, давление и температуру пара, показало, что на предельные значения расхода пара оказывают влия-

ние ряд факторов (давление и температура пара перед турбинами в аварийных режимах, степень колебания частоты). Сложность, а точнее невозможность учета этих обстоятельств заставили автора отказаться от них и рассматривать увеличение расхода пара по расчетным, наиболее тяжелым условиям с точки зрения их воздействия на работу котлоагрегатов и питательной установки. Это будет тем более правильно, что расчетные, предельные значения расхода являются частными случаями и при известных обстоятельствах могут иметь место. Расход пара турбинами с противодавлением типа ВР определяется «проведением» теплового потребителя. Независимо от снижения числа оборотов турбин тепловая нагрузка потребителей, особенно в первое время нарушения режима, останется практически неизменной и для тех турбин, которые находятся на ограничителе противодействия, уменьшение числа оборотов вообще не изменит расход пара. Те турбины, которые имеют возможность регулирования и работают между собой параллельно по отдаче пара на общий коллектор практически не увеличат паровую нагрузку, а только ее перераспределят между собой. Это перераспределение, очевидно, вызвано неоднотипностью настройки регулирования и другими причинами.

Поэтому следует полагать, что при постоянной паровой нагрузке внешних потребителей общий расход пара турбинами ВР останется постоянным при снижении числа оборотов турбин. Этот же вывод подтверждается практическими данными и наблюдениями как при аварийных, так и при нормальных режимах. Количественная оценка увеличению расхода пара турбинами при ухудшении КПД турбин в настоящем расчете интереса не представляет, так как при снижении оборотов турбин до 2500 об/мин расход пара увеличивается на 3,3%, а при 2900 об/мин. только на 0,7%.

Определение времени аварийного отключения котлоагрегатов в зависимости от частоты и напряжения

Зная все воды цилиндрического слоя и пользуясь рис. 1 и 3, можно построить график зависимости времени аварийного отключения котлоагрегатов от снижения частоты и напряжения для различной производительности питательных насосов.

Последовательность расчета принята следующей:

1. По известным значениям сниженного напряжения или частоты или пропорциональному снижению обеих величин находится новое число оборотов насоса на рис. 1.

2. По кривой рис. 3 при данной производительности насоса и по новому числу оборотов определяется величина пониженной производительности.

3. По статическим характеристикам рис. 5 и 7 определяется увеличение расхода пара турбинами с пересчетом на количество питательной воды, приходящееся на один питательный насос.

4. По величине пониженной производительности от этих причин подсчитывается время аварийного отключения котлоагрегатов.

$$t_{ав.к} = \frac{60 G}{Q_{нач.} - (Q_{кон.} - Q')} m \quad (мин) \quad (8)$$

где G — вес воды цилиндрического слоя в барабане котла;
 $Q_{нач.}$ — доаварийная производительность питательного насоса;
 $Q_{кон.}$ — производительность питательного насоса, вызванная уменьшением его числа оборотов;

O' — увеличение расхода пара (питательной воды) от снижения числа оборотов турбин;

m — отношение числа работающих котлоагрегатов к числу работающих насосов.

Так, например, для режима $f = 45$ гц; $U = 3120$ в и $Q_{пв} = 2012$ т/ч, $Q_{пар} = 1910$ т/ч; $Q_{нач.} = 334$ т/ч при числе работающих насосов 6. $Q_{кон.} = 275$ т/ч; $n_{кон.} = 2686$ об/мин.

Увеличение расхода пара турбинами, согласно баланса распределения паровой нагрузки между ними:

$$\text{ВПТ-50-2 (410—350)} = 60 \text{ т/ч; ВПТ-25-3 (220—180) \cdot 4} = 60 \text{ т/ч}$$

Увеличение расхода пара турбинами, согласно балансу распределительный насос:

$$Q' = \frac{60 \cdot 160}{6} = 36,7 \text{ т/ч.}$$

Время аварийного отключения котлоагрегатов:

$$t_{ав. к} = \frac{1,52 \cdot 60}{334 - (275 - 36,7)} \cdot \frac{10}{6} = 1,58 \text{ мин.}$$

Для другой производительности питательной установки и других режимов расчет производится подобным же образом.

На рис. 8 построены кривые для режимов:

1—(45 гц; 3120 в), 2—(47 гц; 3260 в), 3—(48 гц; 3330 в),
4—(49 гц; 3400 в) и

для случая работы питательной установки при отсутствии резерва. В действительности, при нарушении нормального режима, автоматически (при наличии АВР) или вручную пускается один или несколько резервных насосов, если снижение напряжения будет иметь такую величину, что дает возможность им развернуться. При том же режиме и пуске одного резервного насоса изменяется только

$$Q_{кон.} = 275 \cdot \frac{7}{6} = 321 \text{ т/ч и } m = \frac{10}{7}$$

Расчеты показывают, что для частот 47, 48, 49 гц режим восстанавливается за различное время пуском одного резервного насоса. При снижении частоты ниже 46,5 гц для восстановления нормального режима требуется пустить два резервных насоса. На рис. 8 по кривой 5 определяется время аварийного отключения котлоагрегатов при снижении частоты до 45 гц, а по кривой 6 — при снижении частоты до 47 гц и пуске одного резервного насоса. Небезинтересно отметить, что при нормальной частоте и максимальной производительности насоса 334 т/ч опрокидывающий момент наступит при снижении напряжения до $0,66 U_n$. В этом случае питательные насосы останутся и вода в барабанах котлов опустится до предельного за 27 сек (см. формулу 8):

Определение времени разгона резервных питательных электронасосов при различном напряжении на секциях собственных нужд

Время разгона резервных питательных насосов вносит существенную поправку в выбор уставок по времени для АДУ. Это время прежде всего зависит от величины напряжения на шинах с/н, которое ниже номинального вследствие общего снижения напряжения в системе и за счет пуска насоса (насосов).

При определении уменьшения напряжения, вызванного пуском насоса, составляется обычная схема замещения электрической цепи от

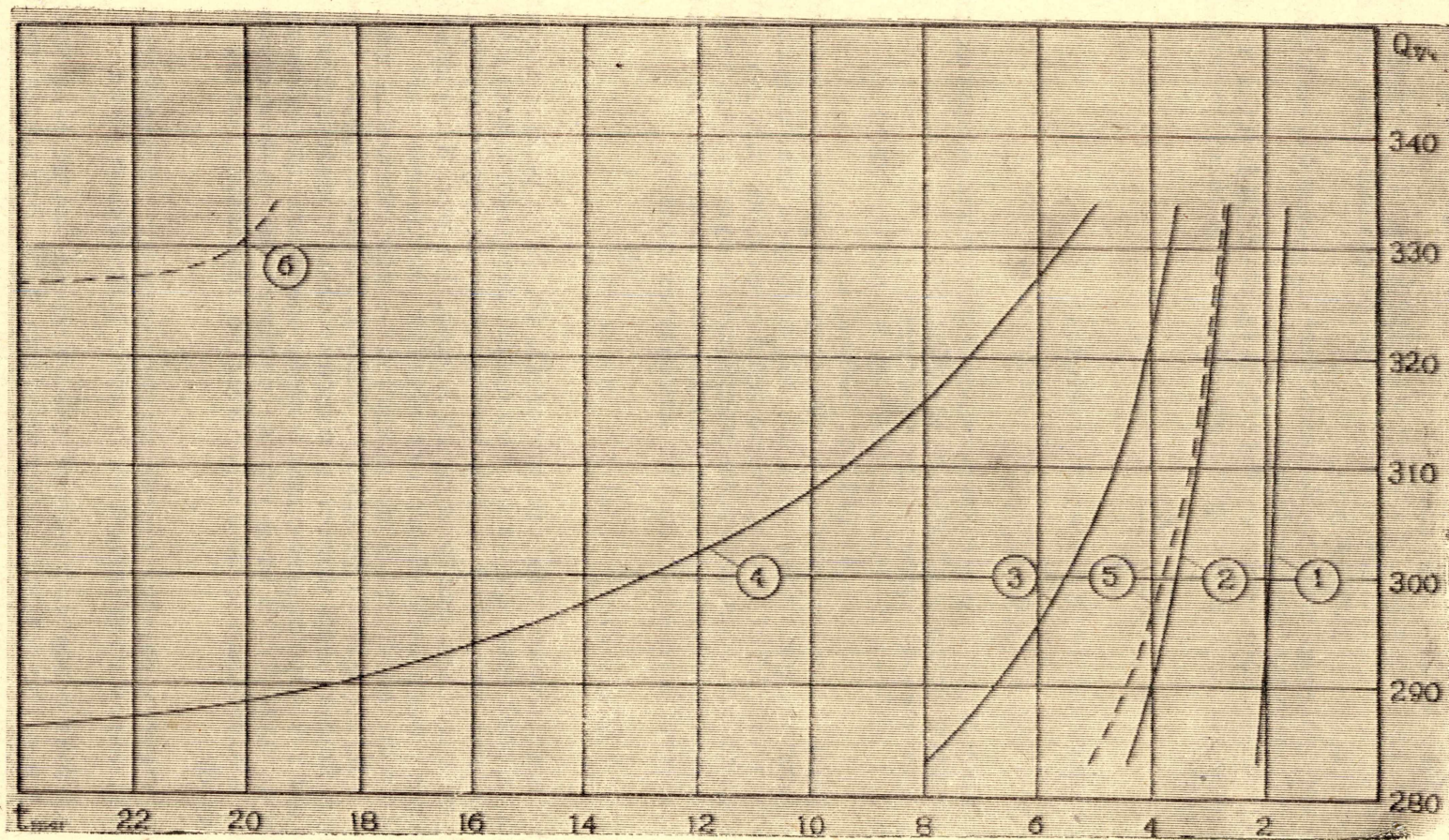


Рис. 8. Время аварийного отключения котлоагрегатов в зависимости от частоты и напряжения в электрической схеме с/н электростанции. Кривые 1 для частоты 45 гц; 2—47 гц; 3—48 гц; 4—49 гц; 5—45 гц и пуске одного резервного насоса; 6—47 гц и пуске одного резервного насоса.

электродвигателя насоса до распределительного устройства генераторного напряжения, шины которого можно принять при расчете за неограниченную мощность. На исследуемой ТЭЦ напряжение на секции с/н от пуска резервного насоса снижается до величины $0,925 U_n$, а с учетом общего понижения напряжения в системе оно будет иметь значения: при $0,9 U_n$ — 80%, $0,8 U_n$ — 71%, $0,7 U_n$ — 62%.

Определение времени разгона питательного насоса при пониженных напряжениях в системе и номинальной частоте производится графическим методом, исходя из построенных зависимостей вращающего момента от скольжения при различных величинах пониженного напряжения и момента сопротивления при максимальной производительности насоса 334 т/ч (рис. 9). Надо отметить, что кривые вращающих моментов построены расчетным путем только в диапазоне скольжения $S = 0 \div 0,05$. В этом случае расчетные значения активных и индуктивных сопротивлений не изменяются и кривые вращающих моментов совпадают с действительными.

Построение пусковой характеристики АТМ-2000-2 расчетным путем является принципиально невозможным из-за невозможности учета добавочных потерь

Поэтому кривые вращающего момента для диапазона этих скольжений взяты для различных значений пониженного напряжения из опытных материалов [7]. Кривая момента сопротивления питательного насоса (7) рис. 9 при пуске с закрытой задвижкой взята также из опытных материалов. Моменты сопротивлений насоса при открытом обратном клапане определены расчетным путем выше. Точка пересечения моментов сопротивления при закрытой задвижке соответствует скольжению 0,287 или числу оборотов ротора 2140 об/мин. Следовательно, при этом числе оборотов произойдет открытие обратного клапана при пуске. Зависимость вращающего момента от скольжения (кривые 1, 2, 3, 4, 5, 6) взята для напряжений на электродвигателе соответственно $1,0 U_n$, $0,925 U_n$, $0,9 U_n$, $0,83 U_n$, $0,8 U_n$, $0,7 U_n$ при номинальной частоте. Из графического анализа видно, что электродвигатель может развернуться при пуске, если напряжение на нем будет не менее $0,83 U_n$.

Кривые избыточного или динамического момента (2', 3', 4') построены для напряжений соответственно $0,925 U_n$, $0,9 U_n$, $0,83 U_n$ графическим способом, как разница ординат между вращающим моментом и моментом сопротивления при расчетной производительности 334 т/ч. На этом же рис. 9 обозначены кривые моментов сопротивления от 1" до 12", соответствующие производительностям: 353, 334, 320, 300, 280, 260, 247, 220, 200, 180, 160, 140 т/ч.

Время разгона электронасоса определяется по методу последовательных интервалов

$$t_{\text{п}} = -T_j \left(\frac{-\Delta S_1}{m_{\text{из.1}}} + \frac{-\Delta S_2}{m_{\text{из.2}}} + \dots + \frac{-\Delta S_n}{m_{\text{из.п}}} \right) \quad (9)$$

T_j — механическая постоянная времени агрегата;

$$T_j = \frac{GD_{\text{прив.}}^2 n_1^2}{364 P_n} = \frac{0,324 \cdot 3000^2}{364 \cdot 2000} = 4 \text{ сек.} \quad (10)$$

$GD_{\text{прив.}}^2 = GD_{\text{дв.}}^2 + GD_{\text{пн.}}^2 = 0,31 + 0,0138 = 0,324 \text{ т. м}^2$ — маховый момент агрегата.

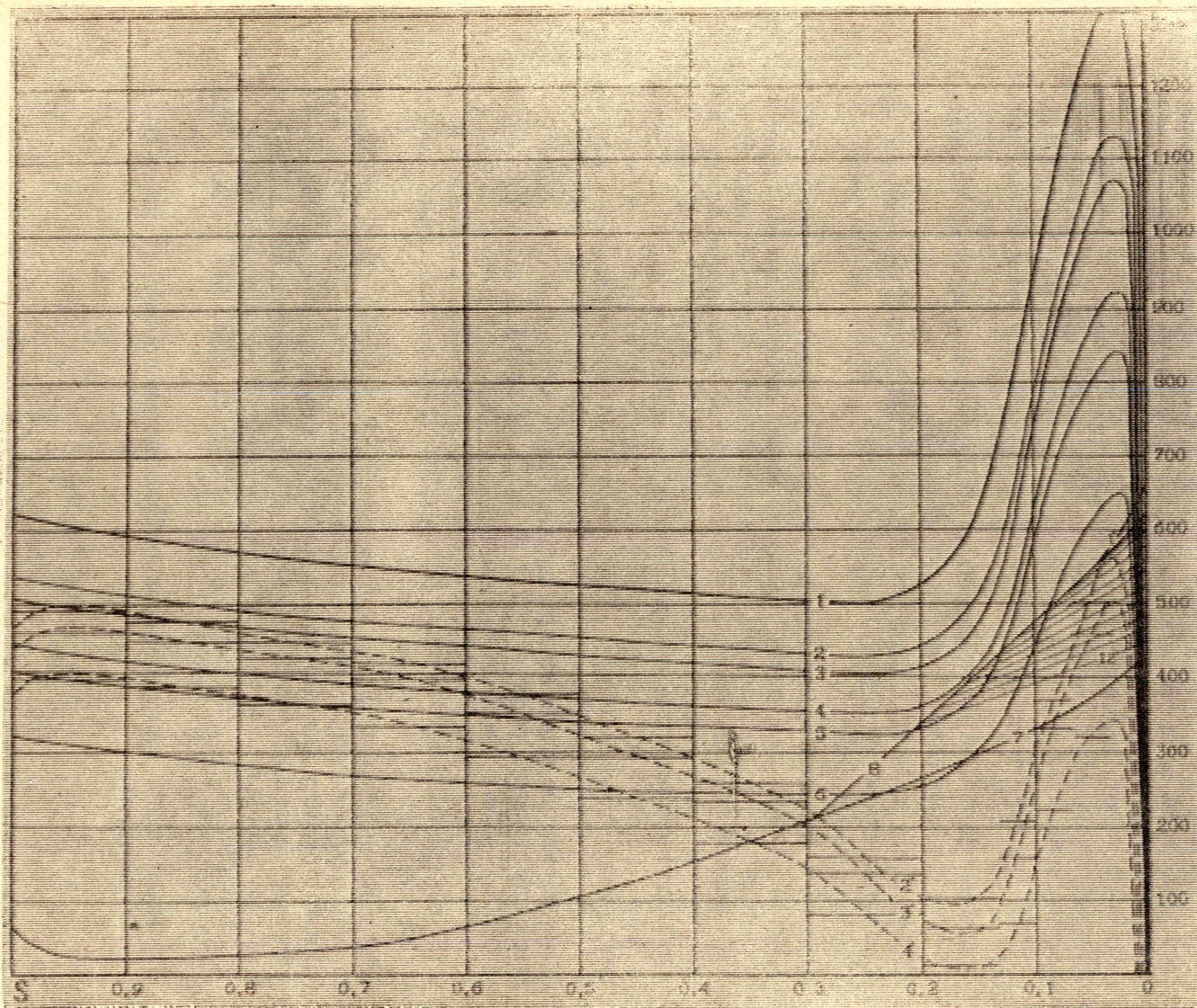


Рис. 9. Определение времени разгона питательного электронасоса при различном значении напряжения в схеме с/н.

ΔS — участки скольжения, на которые разбит график;
 $m_{из}$ — кратность избыточных моментов в пределах этих же участков по отношению к номинальному.

Для напряжений $0,925 U_n$ $t_{пн} - 9,1$ сек; $0,9 U_n - 11,2$ сек;
 $0,83 U_n - 23,2$ сек.

Выбор уставок по напряжению, частоте и времени для АДУ

Пусковой орган АДУ, реагирующий на снижение напряжения, частоты или обеих величин одновременно и имеющий выдержки по времени, должен послать командный импульс на программное устройство, которое воздействует на цепи управления выключателями как главной схемы, так и схемы собственных нужд.

1. *По напряжению.* Уменьшение напряжения на электродвигателе приводит к незначительному уменьшению числа оборотов питательного электронасоса, а следовательно, и производительности. Даже такая глубокая посадка напряжения, как $0,7 U_n$ при производительности насоса 334 т/ч вызывает уменьшение числа оборотов с 2980 до 2952 об/мин. (рис. 1), что составляет 1% . При таком снижении числа оборотов потери производительности вообще не произойдет за счет запаса по степени открытия питательного клапана. Поэтому задавать уставку по напряжению нет необходимости.

2. *По времени.* Для пускового органа АДУ выбор уставок по времени сводится к учету времени аварийного отключения котлоагрегатов, пуска резервных питательных насосов, времени действия промежуточных реле выходных цепей и выключателей. Кроме этого, необходимо учитывать запас по времени, принимая во внимание естественную погрешность расчета и психологическое состояние обслуживающего персонала при уменьшении уровня воды в барабанах котлов.

Исходя из этого, кажется разумным принять коэффициент запаса в пределах $1,33 \div 2$. $K_3 = 1,33$ означает, что командный импульс на запуск АДУ будет подан за вычетом времени пуска резервных насосов, времени срабатывания промежуточных реле и выключателей при упуске 75% воды цилиндрического слоя барабана котла.

$$\frac{t_{ав.к}}{K_3} = \frac{t_{ав.к}}{1,33} \Rightarrow 0,75 t_{ав.к}$$

Таким образом, диапазон изменения $K_3 = 1,33 \div 2$ сравнительно небольшой и определяет собой разницу во времени подачи командного импульса, в соответствии с величиной $(0,75 \div 0,5) t_{ав.к}$.

Величина коэффициента запаса изменяет зону неселективности по частоте, влияет на выбор уставок по времени, но не оказывает воздействие на зону нечувствительности. Коэффициент надежности K_n , который определяет собой разные условия пуска резервных насосов (степень набивки сальников, общее состояние агрегата), как и во многих расчетах, принимается равным $1,1$.

В общем виде формула для определения выдержки времени АДУ с учетом всех перечисленных факторов будет иметь вид:

$$t = \frac{t_{ав.к}}{K_3} (K_n t_{пн} + t_{сх}) \quad (\text{сек.}) \quad (11)$$

где $t_{пн}$ — время пуска резервных питательных насосов;
 $t_{сх}$ — время срабатывания промежуточных реле выходных цепей и выключателей.

По опытным данным оно составляет около двух сек.

3. По частоте. В режимах как максимальных, так и минимальных нагрузок питательной установки кривые времени аварийного отключения котлоагрегатов при снижении только частоты и одновременно снижении частоты и напряжении практически совпадают, поэтому для упрощения схемы можно задавать уставку только по частоте. Принимая во внимание большой разброс по времени аварийного отключения при изменении частоты в пределах $50 \div 45$ гц целесообразно пусковой орган АДУ выполнить 2 каскадным.

Учет наличия зон нечувствительности и неселективности по частоте должен быть определяющим фактором при выборе уставок. Если задана уставка первого каскада 45 гц, а второго 48 гц, следовательно, с одной стороны, в пределах частот $50 \div 48$ гц, лежит зона нечувствительности, а с другой стороны, в пределах уставок частот I и II каскадов — зона неселективности. Правильный выбор уставок по частоте может быть произведен после определения зон нечувствительности и неселективности.

При определении зоны нечувствительности необходимо знать заданную уставку по частоте. Достаточным первоначальным условием для определения зоны неселективности является зависимость времени отключения котлоагрегатов от частоты. Эта зависимость определяется из рис. 8 для производительности насоса 334 т/ч и представляет собой кривую I на рис. 10. Если первоначально принять уставку по частоте для первого и второго каскада соответственно 45 и 48 гц, то для этого диапазона частот время срабатывания АДУ без учета коэффициента запаса определяется по формуле (11), на основании чего строится кривая 2 рис. 10.

Для восстановления нормального режима при снижении частоты в пределах $46,5 \div 45$ гц требуется пустить два резервных питательных насоса с временем пуска каждого, наиболее неблагоприятном случае, равным 23,2 сек. Пуск второго резервного насоса при частоте 46,5 гц и определил на рис. 10 появление горизонтального порога.

При определении времени срабатывания АДУ с учетом коэффициентов запаса построены кривые: 3—($K_3=1,33$); 4—($K_3=1,5$); 5—($K_3=1,75$); 6—($K_3=2$).

Зоны неселективности зависят от следующих причин:

1. Заданных уставок по частоте.
2. Коэффициентов запаса.
3. Производительности питательного насоса в нормальном режиме.
4. Числа пускаемых резервных насосов.

Как видно из рис. 10 при $K_3=1,33$ и первоначально заданных уставок по частоте $f_1=45$ гц; $f_{II}=48$ гц зона неселективности второго каскада определится перпендикуляром на ось времени до пересечения с кривой 2. Эта точка пересечения соответствует частоте 47 гц, поэтому зона неселективности имеет диапазон $47 \div 45$ гц и при понижении частоты в этом пределах второй каскад хотя и придет в действие, но АДУ сработает со временем большим, чем потребуются на упуск воды из барабанов котлов. Нетрудно определить зону неселективности и для других значений K_3 , которая при увеличении его будет уменьшаться. Иметь зону неселективности особенно при частотах, близких к уставке первого каскада, нежелательно, так как работа АДУ в этом случае не будет иметь смысла. По условию надежности требуется, чтобы рабочая зона частот первого каскада перекры-

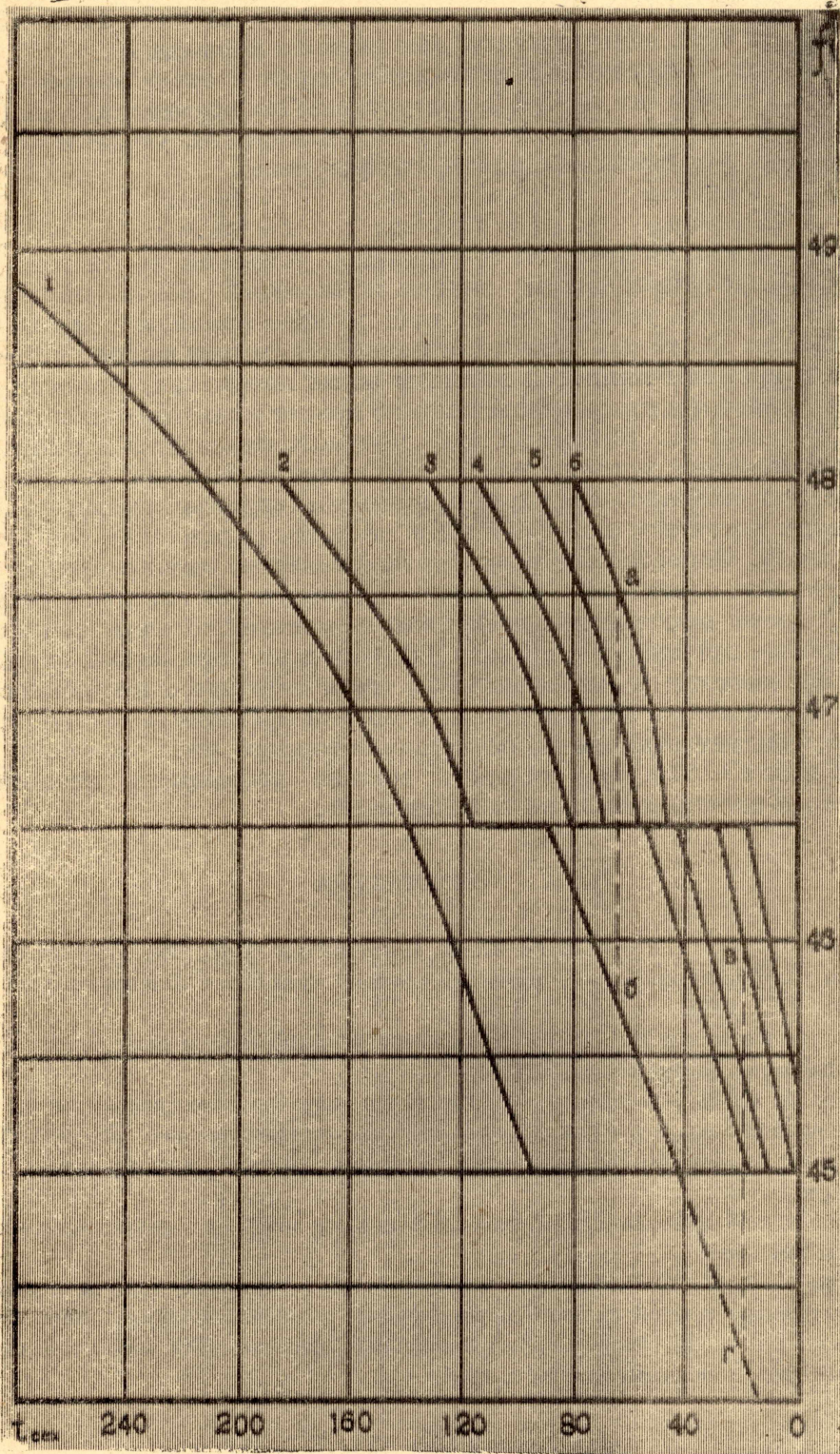


Рис. 10. Определение зон неселективности и нечувствительности по частоте для АДУ.

валась рабочей зоной частот второго каскада величиной, порядка 0,25 гц, тогда рабочая зона частот первого каскада будет иметь границы 46+44,25 гц (точки «в» и «г»), а второго каскада 47,5+45,75 гц (точки «а» и «б»), если принять для первого каскада $K_3=1,75$, а для второго $K_3=2$. Пересечения перпендикуляров с осью времени, опущенных из точек «а» и «в», дают уставки по времени для АДУ. Таким образом, отстраиваясь от зон неселективности, уставки по частоте и времени надлежит выбирать следующими:

I каскад	$f=46, \text{ гц};$	$t=18 \text{ сек}$
II каскад	$f=47,5 \text{ гц};$	$t=60 \text{ сек}$

Пользуясь кривыми рис. 10, и задавая уставкой по частоте второго каскада, коэффициентом запаса и частотой зоны перекрытия, можно определить уставку по частоте первого каскада и время срабатывания этих каскадов. Основным недостатком при выборе уставок по частоте и времени является наличие зоны нечувствительности (мертвая зона), которая при данном расчете лежит практически в пределах частот 49+47,5 гц. Избежать зону нечувствительности можно рядом мер: повышением уставки по частоте второго каскада, вводом в схему третьего каскада, эксплуатационными мероприятиями режимного порядка и ручным запуском АДУ со щита управления без выдержки, времени. Сопоставляя результаты расчетов, можно прийти к выводу, что при снижении частоты в пределах 45 гц, тепломеханические процессы протекают интенсивно и в какой-то мере соизмеримы по времени с процессами, происходящими в электрической схеме. При снижении частоты в пределах 48 гц тепломеханические процессы протекают значительно медленнее. Для органа времени АДУ лучшим вариантом следует считать применение моторного реле времени типа E—512 или E—513, на котором можно выполнить независимые уставки не только для 2, но и 3 каскадов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Портной М. Г., Руденко Ю. Н., Ясников В. Н., Объединение энергосистем Сибири слабыми магистральными связями, «Электрические станции», № 5, 1963.
2. Сыромятников И. А., Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей, Госэнергоиздат, 1963.
3. Кирш А. К., Шишкин А. Г., Снижение расхода электроэнергии на подачу питательной воды насосами 5Ц.10 Бердянского механического завода, БТИ, 1961.
4. Уральский турбомеханический завод, Описание систем регулирования турбины ВПТ-25-3.
5. Ленинградский металлический завод, Описание систем регулирования турбины ВПТ-50-2.
6. Материалы Ц. К. Б., Повышение электрической и тепловой мощности действующих электростанций за счет модернизации основного оборудования, 1962.
7. Ливанова О. В., Самозапуск питательных насосов ТЭЦ высокого давления, «Электрические станции», № 2, 1958.