

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЭНЕРГОСИСТЕМ

В. А. Веников

**Исследование режимов сбросов и набросов мощности
в электрических системах**

В настоящее время весьма обстоятельно разработаны методы исследования переходных режимов в электрических системах применительно к задачам расчета токов короткого замыкания и устойчивости параллельной работы. Однако эти, как их называют, расчетные режимы, вообще говоря, являются некоторыми частными случаями переходного режима системы в целом. Так, расчеты токов короткого замыкания ведутся, как правило, в предположении постоянства скорости вращения генераторов, без рассмотрения изменения баланса мощности в нестационарном процессе. Здесь, таким образом, рассматриваются только электромагнитные процессы.

При расчетах устойчивости рассматриваются как электромагнитные, так и электромеханические процессы, но предполагается, что изменения скорости малы и механическая мощность принимается пропорциональной электрической мощности.

Изменение мощности первичного двигателя (турбины) при этом, обычно, не учитывается и предполагается, что в любой момент времени, следующий за изменением режима, она постоянна и равна мощности, имевшей место перед изменением режима. С другой стороны, исследования работы первичных двигателей и их регулирования производятся без учета реального процесса изменения электрической мощности в нестационарном режиме. Значительное время инженера удовлетворяла такая постановка задачи, но в последнее время все более и более выявляется необходимость в разработке отсутствующей пока методики расчета нестационарных режимов, в которых происходят не только электромагнитные процессы, но и электромеханические, связанные с изменением скорости вращения ротора и действием механического регулятора, изменяющего мощность турбины.

При этом должны одновременно рассматриваться и электромагнитные процессы (изменение электрической мощности, изменение напряжения и связанное с этим действие регуляторов напряжения, влияющих на ток возбуждения генератора), и электромеханические процессы (изменения вращающего электромагнитного момента), и ме-

ханические процессы в регуляторах турбины, в результате которых происходит изменение её мощности.

При более строгом подходе здесь следует учесть и влияние процессов, происходящих в трубопроводах. В этом случае мы имеем весьма сложную задачу, сводящуюся к исследованию комплекса: с одной стороны—генератор—турбина—регулятор турбины—трубопровод и с другой—генератор—сеть—нагрузка—регулятор напряжения и, возможно, регулятор частоты. Легко видеть, что все указанные здесь задачи (исследование токов короткого замыкания, устойчивости системы, исследования работы первичного двигателя и его регулирования) составляют лишь частные случаи сформулированной выше комплексной задачи.

Отсюда ясно ее общее методическое значение, помимо уже отмеченного большого значения при решении практических задач.

Трудности, возникающие при решении такой обобщенной задачи, весьма велики. Они заключаются прежде всего в недостаточной практической, экспериментальной изученности этого вопроса, весьма ограниченной в своих возможностях, поскольку экспериментирование здесь должно происходить в мощной электрической системе и в сложности и громоздкости нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих происходящие процессы.

Применение методов теории подобия и моделирования и сооружение динамических моделей электрических систем позволяет заменить экспериментирование в мощных системах экспериментированием в лабораторных условиях и дает возможность обоснованно упростить сложные уравнения, проверив вводимые упрощения экспериментально.

Настоящая работа содержит первый этап исследования, заключающийся в выводе и решении основных уравнений, описывающих комплекс рассматриваемых вопросов.

Составление дифференциальных уравнений комплекса—генератор—турбина—регулятор—трубопровод начнем с записи уравнений отдельных элементов системы, схематически представленной на левой части рис. 1.

Уравнение маятника центробежного регулятора записываем, как обычно, в виде

$$T_r p^2 h + T_k p h + \sigma h = \varphi = S,$$

где σ —коэффициент неравномерности регулятора,

$$\sigma = \frac{\Delta \omega_{\max}}{\omega_0};$$

S —скольжение,

$$T_r = \sqrt{\frac{M_r J_{\max}(m)}{2E}}; \quad T_k = \frac{r J_{\max}(m)}{2E};$$

здесь $J_{\text{макс}(м)}$ — максимальное смещение муфты регулятора, M_c — приведенная масса муфты, γ — коэффициент трения,

$$E = G_1 + 2G_2 \frac{U}{V} + 2F_n \frac{W}{V},$$

где G_1 — вес муфты, G_2 — вес одного шара, $\frac{U}{V}$ — отношение вертикальной составляющей скорости движения шаров и скорости движения муфты, $\frac{W}{V}$ — то же, но горизонтальной составляющей, F_n — натяжение пружины. Пренебрегая собственными колебаниями муфты регулятора и его демпфированием и полагая $T_r = 0$, $T_k = 0$, получаем упрощенное уравнение маятника регулятора: $\sigma h = -\varphi$.

Относительное смещение золотника сервомотора (ρ) связано со смещением муфты регулятора (h) уравнением $\rho = h - \beta h$, где β — коэффициент обратной связи, наличие которой приводит к запаздыванию смещения поршня относительно муфты.

Движение задвижки направляющего аппарата, связанное непосредственно* с поршнем сервомотора, характеризуется уравнением:

$$T_m^2 \rho^2 \mu + T_n \rho \mu - \rho = 0,$$

где μ — относительное смещение поршня $\mu = \frac{\Delta Z}{Z_{\text{макс}}}$.

Здесь T_n характеризует приведенную массу (M) подвижных частей, связанных с поршнем сервомеханизма:

$$T_n = \sqrt{\frac{M_n Z_{\text{макс}}}{F_c \Delta P_n}},$$

$Z_{\text{макс}}$ — максимальное абсолютное смещение поршня,

F_c — рабочая площадь сервомотора,

ΔP_n — максимальный перепад давления, действующий на поршень сервомотора,

T_n — постоянная, характеризующая скорость открытия направляющего аппарата, численно равная времени, которое необходимо для того, чтобы сервомотор, открывая клапаны, прошел максимальный путь $Z_{\text{макс}}$ при максимальном открытии золотника и неизменном перепаде давлений.

Строго говоря, величина T_n не является постоянной, т. к. зависит от уровня подъема поршня. Кроме того, T_n при открытии и закрытии клапанов, т. е. при сбросе и набросе нагрузки, имеет различные значения. Однако мы, следуя обычно принимаемым допущениям, не будем учитывать этих уточняющих обстоятельств и примем $T_n = \text{Const}$.

Определение T_n через конструктивные параметры регулятора

* Аналогично могли быть рассмотрены и системы с двойным усилением.

может быть сделано, в зависимости от конструкции регулятора и в зависимости от методики исследования, различным образом. Так, например, можно воспользоваться формулой:

$$T_s = \frac{F_c Z_{\max}}{X_{\max} b \alpha \sqrt{\frac{2g\Delta P_n}{\gamma}}},$$

где, кроме обозначений, поясненных выше,

X_{\max} — максимальный рабочий ход золотника,

α — коэффициент расхода окон золотника,

b — ширина окон золотника,

γ — удельный вес,

g — ускорение силы тяжести.

Объединяя уравнение золотника и уравнение сервомотора, получим:

$$T_m^2 p^2 \mu + T_s p \mu = h - \beta \mu.$$

Это уравнение иногда записывают в таком виде:

$$T_s T_s p^2 \mu + T_s p \mu = h - \beta \mu,$$

где $T_s T_s = T_m^2$ или, иначе, $T_s = \frac{T_m^2}{T_s}$.

T_s — называют постоянной времени золотника. Очевидно, что она попрежнему характеризует приведенную массу подвижных частей сервомотора $T_s = M$.

Исключая теперь из обобщенного уравнения сервопривода смещение муфты регулятора η , которое согласно уравнения маятника может быть выражено через скольжение (S) и коэффициент неравномерности (σ), получим:

$$T_s T_s p^2 \mu + T_s p \mu + \beta \mu = - \frac{\varphi}{\sigma}. \quad (1^a)$$

Если пренебречь массой M_n и положить $T_s = 0$, то получим упрощенное уравнение:

$$T_s p \mu + \beta \mu = - \frac{\varphi}{\sigma}. \quad (2)$$

Для поставленной задачи можно с достаточной точностью* считать, что относительное изменение вращающего момента турбины под действием регулятора $M_{\text{рег}} = \frac{M_{\text{рег}}}{M_{\text{нт}}}$ численно равно относительному смещению поршня золотника. Тогда уравнение (2) может быть переписано в следующем виде:

$$p M_{\text{рег}} + \beta \frac{M_{\text{рег}}}{T_s} = \frac{M_{\text{нт}}}{\sigma T_s} \cdot \frac{d\delta}{dt}. \quad (2^a)$$

* Вопрос о границах этого допущения должен быть рассмотрен дополнительно. Это будет сделано в следующей статье.

Отсюда легко перейти к мощности, заменив значение M на $\frac{P}{\omega}$,

$$\text{где } \omega = \omega_0 + \frac{d\delta}{dt}.$$

Если приближенно принять $\omega \cong \omega_0$, то можно записать уравнение (2^а) в следующем виде:

$$pP_{\text{пер}} + \beta \frac{P_{\text{пер}}}{T_s} = \frac{P_{\text{ит}}}{\sigma T_s} p\delta. \quad (2^6)$$

Аналогично через моменты или мощности может быть записано и уравнение (1^а).

В любой момент времени следующий за изменением относительной скорости $\left(\frac{d\delta}{dt} \neq 0\right)$ момент турбины будет определяться как разность между моментом, имевшим место до изменения скорости ($M_{\text{то}}$), и изменением момента под действием регулятора ($M_{\text{пер}}$):

$$M_{\tau} = M_{\text{то}} - M_{\text{пер}}$$

или

$$P_{\tau} = \frac{\omega}{\omega_0} P_{\text{то}} - P_{\text{пер}}.$$

В случаях небольших изменений скорости можно записать:

$$P_{\tau} = P_{\text{то}} - P_{\text{пер}}.$$

Решение приведенных выше уравнений позволит найти с высказанными нами допущениями мощность или момент турбины в любой момент времени с учетом действия регулятора.

Если учесть инерционность чувствительного элемента регулятора и его демпфирование и, следовательно, не полагать $T_r = 0$ и $T_k = 0$, то дифференциальное уравнение регулирования получится более сложным. Это будет уравнение четвертого порядка:

$$P_{\text{пер}} \left(T_s p^2 + p + \frac{\beta}{T_s} \right) \left(\frac{T_r}{\sigma} p^2 + \frac{T_k}{\sigma} p + 1 \right) = \frac{P_{\text{ит}}}{\sigma T_s} p\delta.$$

Очевидно, что уравнения (1^а) и (2) являются частными случаями этого более общего уравнения.

В случае применения изодромного регулятора дифференциальное уравнение, определяющее мощность регулирования, будет записано следующим образом:

$$P_{\text{пер}} p \left(\frac{T_s}{\sigma} p^2 + \frac{T_k}{\sigma} p + 1 \right) \left[\left(T_{\text{м(в)}} p^2 + T_{\text{т(в)}} p + 1 \right) \left(T_s p + 1 \right) + k \frac{T_{\text{т(в)}}}{T_s} \right] = \frac{P_{\text{ит}}}{\sigma T_s} p\delta.$$

Это уравнение будет наиболее общим, учитывающим изодромный механизм, массу маятника регулятора, его демпфирование, инерцию подвижных частей сервомеханизма.

Уравнения эти записаны применительно к случаю, когда при вычислении момента принято $\omega \cong \omega_0$. Формулы для случая более резких изменений скорости, когда указанное равенство нарушается,

получаются заменой $P_{\text{рег}}$ на $\frac{P_{\text{рег}}}{\omega_0 + \rho z^2}$ и $P_{\text{тo}}$ на $\frac{P_{\text{тo}}}{\omega_0}$.

До сих пор мы рассматривали связь между изменением мощности ($P_{\text{рег}}$) турбо- или гидрогенераторов, изменением скорости ротора генератора и параметрами регулирующих устройств и устанавливали уравнения имеющего место механического процесса.

В случае гидрогенератора рассматриваемый процесс может осложниться наличием гидродинамических явлений в трубопроводах. Попытаемся теперь учесть и их.

Дифференциальные уравнения, отражающие переходные процессы, имеющие место в трубопроводе при изменении положения задвижки, т. е. при смещении поршня сервомотора (μ), имеют следующий вид:

$$g \frac{d\xi}{dx} = \frac{dv}{dt}, \quad (3)$$

$$g \frac{1}{\alpha^2} \frac{d\xi}{dt} = -\frac{dv}{dx},$$

где ξ —гидродинамическое давление, α —скорость распространения гидравлического удара, v —скорость воды, g —ускорение силы тяжести.

Переходный процесс в трубопроводе возникает при движении задвижки, которая может с известными допущениями рассматриваться как граница области рассматриваемого процесса.

Пусть некоторому начальному для рассматриваемого процесса открытию задвижки Z_0 , отвечающему мощности $P_{\text{ит}}$, соответствует начальное значение скорости v_0 и давления ξ_0 .

Граничное условие для уравнений (3) может быть записано в следующем виде*:

$$\frac{v_1}{v_0} = \frac{Z}{Z_0} \sqrt{\frac{\xi_1}{\xi_0}}. \quad (4)$$

Здесь индекс (1) соответствует текущим значениям давления и скорости в месте нахождения задвижки, а индекс (0) соответствует некоторому начальному открытию задвижки.

Поскольку нас интересуют отклонения переменных от некоторых начальных значений, соответствующих мощности, то мы можем в уравнении (4) перейти к приращениям давления и скорости и, предполагая, что эти приращения невелики, написать:

* Метод решения автором заимствован из работы В. В. Солодовникова (Технический отчет ВЭИ, 1938 год).

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{\Delta Z}{Z_0} + \frac{1}{2} \frac{\Delta \xi_1}{\xi_0} = \mu + \frac{1}{2} b, \quad (5)$$

$$\text{где } b = \frac{\Delta \xi}{\xi_0}.$$

Уравнение мощности турбины, выраженное через начальную мощность и отклонение мощности, может быть записано так:

$$P_T = \left[\left(\kappa \rho \dot{\omega} \right) J Z_0 \frac{v_0^3}{2} \right] \kappa + \Delta P_T$$

или, с учетом (5), запишем:

$$P_T = P_0 \left(1 + \mu + \frac{3}{2} b \right). \quad (5^a)$$

Общее решение уравнений имеет, как известно, вид:

$$\xi - \xi_0 = F \left(t - \frac{x}{\alpha} \right) + \Phi \left(t + \frac{x}{\alpha} \right), \quad (6)$$

$$v - v_0 = -\frac{g}{\alpha} F \left(t - \frac{x}{\alpha} \right) + \frac{g}{\alpha} \Phi \left(t + \frac{x}{\alpha} \right).$$

Из рассмотрения граничных условий следует, что поскольку при $x=0$, $\xi = \xi_0 = 0$, то $F(t) = -\Phi(t)$.

С учетом этого, уравнение (6) можно преобразовать в следующие, относящиеся к точке $X=L$ (задвижка),

$$\Delta \xi_1 = \xi_1 - \xi_0 = (-e^{-\tau p} + e^{\tau p}) \Phi(t), \quad (7)$$

$$\Delta v = v_1 - v_0 = \left(\frac{g}{\alpha} e^{-\tau p} + \frac{g}{\alpha} e^{\tau p} \right) \Phi(t).$$

Здесь $\tau = \frac{L}{\alpha}$ время, равное половине фазы гидравлического удара. Исключая из уравнения (6) функцию Φ и вводя соотношения, записанные в уравнении (7), найдем:

$$b = \frac{e^{\tau p} - e^{-\tau p}}{k_2 e^{\tau p} + k_1 e^{-\tau p}} = \psi_1 \mu,$$

$$\text{где } k_1 = \frac{2g\xi_0 - \alpha v_0^3}{2\alpha v_0},$$

$$k_2 = \frac{2g\xi_0 + \alpha v_0^3}{2\alpha v_0}.$$

Теперь, подставляя значение b в уравнение (5^a), получим уравнение мощности:

$$P_{T(y)} = P_{T_0} \left[1 + \left(1 + \frac{3}{2} \psi_1 \right) \mu \right].$$

Как мы уже привели выше, $P_T = P_{T_0} - P_{\text{рег}}$. Введем теперь следующие обозначения:

$P_{\text{рег}}$ — мощность регулирования (изменение мощности под действием регулятора, реагирующего на изменение скорости ротора) в случае неучета явлений, связанных с гидравлическим ударом.

$P_{\text{рег}(y)}$ — мощность регулирования, с учетом гидравлического удара. Следовательно, на основании (5^a), можно написать:

$$P_{\text{рег}(y)} = P_{\text{рег}} \left[1 + \frac{3}{2} \psi \right],$$

или, обозначая $\left[1 + \frac{3}{2} \psi \right] = \psi_y$,

имеем:

$$P_{\text{рег}(y)} = P_{\text{рег}}(\psi_y).$$

Итак, учет гидравлического удара в процессе регулирования в первом грубом приближении сводится к тому, что во всех приведенных выше уравнениях величину $P_{\text{рег}}$ следует заменить на величину $P_{\text{рег}(y)}$, т. е. ввести в уравнение функцию ψ_y . При этом следует помнить, что при преобразовании уравнений были сделаны допущения о малых значениях $\Delta \xi$ и ΔZ , что накладывает определенные ограничения на методику решения уравнений в случае учета гидравлического удара.

Несмотря на значительные осложнения уравнений регулирования с учетом гидравлического удара, решение их все же может быть найдено.

В уравнения комплекса турбина—регулятор—трубопровод вошла величина $r\delta$, т. е. относительная скорость движения ротора.

$$r\delta = \omega - \omega_0.$$

Эта величина зависит от баланса механической и электрической мощности, в свою очередь зависящего от параметров генератора, параметров сети и их изменений, параметров устройств регулирующих напряжение генератора. Следовательно, решение поставленной задачи требует рассмотрения совместной работы механической и электрической части гидро- или турбогенератора, с его регулирующими устройствами и сетью, включая в нее и нагрузку.

Для решения второй части рассматриваемой задачи необходимо составление дифференциальных уравнений комплекса генератор—сеть—нагрузка—регулятор напряжения.

Составление уравнений опять-таки начнем с записи уравнений отдельных элементов системы, представленной на правой части схемы рис. 1.

Начнем с уравнения генератора. Нестационарные электромеханические процессы в генераторе наиболее полно могут быть отражены с помощью так называемых уравнений Парка—Горева, записываемых в операторной форме.

Уравнение баланса мощностей или вращающих моментов выглядит следующим образом:

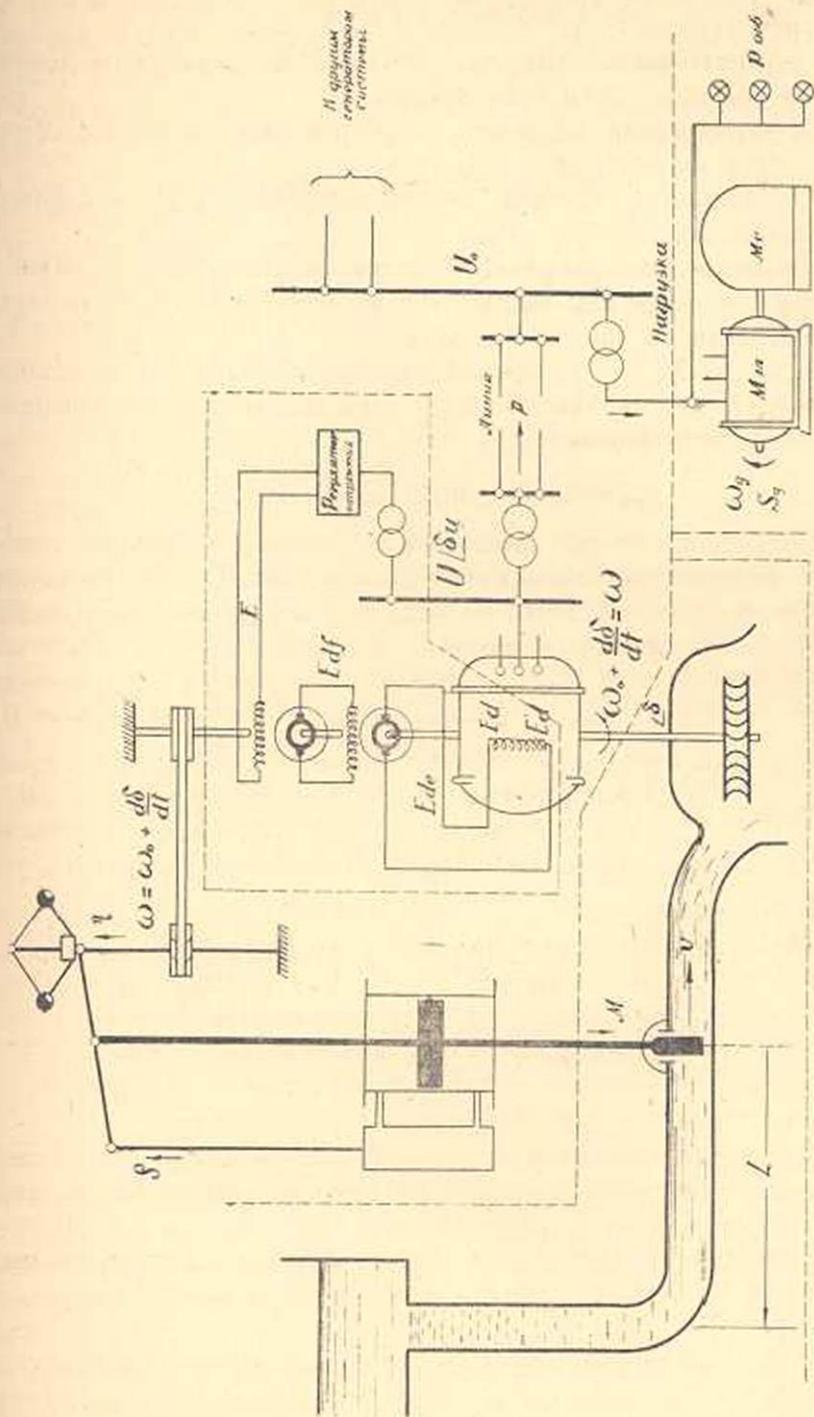


Рис. 1. Схема испытательной установки.

$$M p^2 \delta = P_T - P_{эл} - P_d, \quad (8)$$

где P_d — асинхронная мощность, обусловленная действием демпферных обмоток и обмотки возбуждения,

$P_{эл}$ — синхронная мощность, обусловленная действием обмоток возбуждения и реактивным моментом,

P_T — мощность турбины, определяющаяся, согласно сделанных выше замечаний, как $P_{T0} - P_{пер}$,

M — постоянная инерции, численно равная времени разгона ротора под действием номинального вращающего момента от неподвижного состояния до синхронной скорости.

Величины $P_{эл}$ и P_d , представляющие электрическую мощность или, точнее, противодействующий вращающий момент генератора, изменяются во времени:

$$P_{эл} = f(t); P_d = i(t); P'_{эл} = P_d + P_{эл}.$$

Характер изменения зависит от параметров генератора, сети нагрузки, регуляторов напряжения и того, какое имеет место нарушение режима, т. е. зависит от величины и вида возмущения. Величина $P'_{эл}$, в соответствии с теорией двух реакций, может быть определена как

$$P'_{эл} = \psi_d i_q - i_d \psi_q,$$

где ψ , i — потокосцепление и, соответственно, ток статора по продольной (d) или поперечной оси (q).

ψ_d и ψ_q связаны с параметрами генератора и сети током возбуждения и напряжением на клеммах генератора следующим уравнением:

$$U_d = p\psi_d - \frac{r}{x_d(p)} \left[G(p)E - \psi_d \right] - \psi_q p(t + \delta),$$

$$U_q = -p\psi_q - \frac{r}{x_q(p)} \psi_q + \psi_d p(t + \delta),$$

где

r — активное сопротивление цепи статора, $X_d(p)$; $X_q(p)$ — операторное сопротивление, определяющееся через параметры машины и параметры сети.

Продольная и поперечная составляющие тока статора выражаются как

$$i_d = \frac{G(p)E - \psi_d}{x_d(p)},$$

$$i_q = \frac{\psi_q}{x_q(p)},$$

где E — относительное напряжение на клеммах обмотки возбуждения. Сложность записанных уравнений, еще более увеличивающаяся при

учете системы возбуждения, делает нерациональным использование их при решении рассматриваемой задачи — анализе процессов сброса и наброса мощности в электрической системе.

Можно резко упростить записанные выше выражения, отказавшись от учета членов, отражающих апериодические составляющие цепи статора и периодические составляющие цепи ротора, а также не учитывая активного сопротивления обмоток статора.

В этом случае $U_d = -\psi_q$,

$$U_q = \psi_d.$$

Система уравнений принимает вид:

$$P'_{\text{эа}} = i_d U_d + U_q i_q; \quad (10)$$

$$i_d = \frac{G(p)}{X_d(p)} U_d - \frac{U \cos \delta}{X_d(p)}; \quad i_q = -\frac{U \sin \delta}{X_d(p)}.$$

Следует отметить, что такая форма записи уравнения мощности соответствует работе Парка, где составляющая напряжения по продольной оси обозначается U_q , а составляющая по поперечной оси U_d (аналогично токам). В советской литературе более распространена иная запись уравнений, при которой составляющая напряжения по продольной оси обозначается U_d . В этом случае уравнение мощности записывается в виде:

$$P'_{\text{эа}} = i_d U_q + i_q U_d. \quad (10^*)$$

Мы будем пользоваться в дальнейшем этим выражением. При этом

$$U_d = \psi_d = U \cos \delta,$$

$$U_q = \psi_q = U \sin \delta.$$

Подставляя приведенные выше значения U_d , U_q , i_d , i_q в уравнение (10*), получим:

$$P'_{\text{эа}} = \frac{E_{\text{до}} U}{X_d} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_q X_d} \sin 2\delta + U^2 \sin \delta \frac{X_d - X_d(p)}{X_d X_d(p)} \cdot (\cos \delta_0 - \cos \delta) + U^2 \cos \delta \frac{X_q - X_q(p)}{X_q X_q(p)} (\sin \delta - \sin \delta_0).$$

Последние два члена отражают мощность, обусловленную как обмоткой возбуждения, так и демпферными обмотками.

Мощность эта появляется только в переходном процессе в связи с появлением свободных токов и токов, обусловленных скольжением в обмотках генератора.

Принимая что скольжение постоянно, можно относительно просто раскрыть приведенные выше выражения во времени, перейдя к зависимости $P'_{\text{эа}} + f(t)$. В этом случае, прибегая к приближенному приему наложения мощностей*, получаем:

* Лебедев и Жданов — Устойчивость параллельной работы электрических систем. Москва, 1934.

$$P'_{\text{эл}} = P_{\text{эл}} + P_{d_{\text{возб}}} + P_{d(d)} + P_{d(q)} = P_{\text{эл}} + P_D,$$

где $P_{\text{эл}}$ — синхронная мощность, обусловленная как свободными, так и установившимися токами ротора (при $S=0$); значение этой мощности может быть записано в следующем виде:

$$P_{\text{эл}} = \frac{E'_d U}{X'_d} \sin \delta - U^2 \frac{X_q - X'_d}{2X_q X'_d} \sin 2\delta, \quad (11)$$

$$E'_d = E_d \frac{X'_d}{X_d} + \frac{X_d - X'_d}{X_d} U \sin \delta, \quad (12)$$

$P_{d_{\text{возб}}}$ — мощность, появляющаяся при $S \neq 0$ и обусловленная обмоткой возбуждения,

$P_{d(d)}$ — мощность, появляющаяся при $S \neq 0$ и обусловленная наличием демпферной обмотки в продольной оси,

$P_{d(q)}$ — то же в поперечной оси.

Автор настоящей работы, совместно с канд. техн. наук Л. А. Жуковым, пользуясь методом, предложенным П. С. Ждановым, получил выражение для P_D , пригодное для расчетов в системе, содержащей любое число станций при учете нагрузок и полных сопротивлений сети.*

Эти выражения для гидрогенератора имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} P_D = & P_{\text{срб}} \left[1 \mp \sqrt{1 + (ST'_d)^2} \sin \left(2\delta + 2\alpha - 2\alpha_{12} - \arctg \frac{1}{ST'_d} \right) \right] + \\ & + P_{\text{срд}} \left[1 \mp \sqrt{1 + (ST''_d)^2} \sin \left(2\delta + 2\alpha - 2\alpha_{12} - \arctg \frac{1}{ST''_d} \right) \right] + \\ & + P_{\text{срч}} \left[1 \mp \sqrt{1 + (ST''_q)^2} \sin \left(2\delta + 2\alpha - 2\alpha_{12} - \arctg \frac{1}{ST''_q} \right) \right], \quad (13) \end{aligned}$$

где $P_{\text{срб}}$, $P_{\text{срд}}$, $P_{\text{срч}}$ — средние значения асинхронной мощности, обусловленной, соответственно, обмоткой возбуждения, демпферной продольной и демпферной поперечной обмотками. Эти величины определяются так:

$$\begin{aligned} P_{\text{срб}} = & U^2 \frac{(X_d - X'_d)}{2Z_{12}^2 \left(1 - \frac{X_q - X'_d}{Z_{11}} \cos \alpha_{11} \right)} \cdot \frac{ST'_d}{1 + (ST'_d)^2}, \\ P_{\text{срд}} = & U^2 \frac{(X_d - X_d'')}{2Z_{12}^2 \left(1 - \frac{X_q - X'_d}{Z_{11}} \cos \alpha_{11} \right) \left(1 - \frac{X_q - X_d''}{Z_{11}} \cos \alpha_{11} \right)} \cdot \\ & \frac{ST''_d}{1 + (ST''_d)^2}, \end{aligned}$$

* См. статью в журнале „Электричество“, № 7, стр. 8, 1950.

$$P_{ср\alpha} = U^2 \frac{x_q - x_q''}{2Z_{12}^2 \left(1 - \frac{x_q - x_q''}{Z_{11}} \cos \alpha_{11} \right)} \cdot \frac{ST_q''}{[1 + (ST_q'')^2]}$$

где α — начальный угол отсчета.

При небольших изменениях скорости ротора, например, при исследовании устойчивости в режимах, когда рассматривается первый цикл качаний, следует пользоваться развернутым выражением демпферного момента. В случаях же исследований асинхронного хода, длительных качаний, исследований условий синхронизации и самосинхронизации, когда ротор совершает периодические качания около положения равновесия с некоторой средней скоростью, рекомендуется пользоваться только выражениями средней мощности, определяя P_D так:

$$P_D = P_{ср\beta} + P_{ср\delta} + P_{ср\alpha}. \quad (14)$$

Разумеется, что решив операторное уравнение при условии постоянного скольжения, т. е., иными словами, приняв зависимость

$$\delta = i(t) = \frac{\pi}{2} - \alpha \pm S_{ср} t,$$

допускаем известную неточность.

Кроме того, при решении тех или иных задач мы должны заранее оценить возможное изменение скольжения и принять некоторые его значения в качестве средней величины ($S_{ср}$).

При расчетах методом последовательных интервалов можно будет разрешить указанное противоречие, применяя приведенные выше формулы в каждом расчетном интервале и используя значение скольжения, определенное в каждом последующем интервале по предыдущему, и значение угла, соответствующего концу предыдущего интервала.

Определение величины E_d , входящей в уравнение (12), при этом будет производиться, исходя из следующей системы уравнений, характеризующей систему возбуждения:

$$E_d = E_{dv} - T_o p E_d', \quad (15^a)$$

$$E_{dv} = E_{df} - T_e p E_{dv}, \quad (15^b)$$

$$E_{df} = E_{рег} - T_f p E_{df}. \quad (15^c)$$

В этих уравнениях обозначено E_d — э.д.с. холостого хода по продольной оси,

E_d' — продольная составляющая переходной э.д.с.,

E_{dv} — э.д.с. возбудителя, E_{df} — э.д.с. подвозбудителя,

$E_{рег}$ — напряжение, подаваемое от регулятора в цепь обмотки возбуждения подвозбудителя,

T_o — постоянная времени цепи возбуждения генератора,

T_e — то же цепи возбудителя,

$T_{1,2}$ — то же цепи возбуждения возбудителя.

Величина напряжения регулятора $E_{рег}$ зависит от типа регулятора, его параметров и вида нарушения аварии. Не уточняя сейчас этих факторов, можем в общем виде записать, что

$$E_{рег} = E_0 + K_u (U - U_0) + K_\beta (\beta - \beta_0) + K'_u pU + K''_u p^2 \delta, \quad (16)$$

где K_u , K_β , K'_u , K''_u — коэффициенты регулирования.

При такой записи предполагается, что регулирование производится по отклонению напряжения, отклонению угла, производной по напряжению и производной по углу.* Инерционностью регулятора и переходными процессами в нем при этом пренебрегаем, предполагая что последние протекают значительно быстрее, чем процессы в обмотке возбуждения.

Разумеется, что тот или иной вид регулирования может отсутствовать. Например, при регулировании только по отклонениям напряжения имеем:

$$E_{рег} = E_0 + K_u (U - U_0). \quad (17)$$

Очевидно, что если даже не проводить в развернутой форме учета демпферной мощности, приняв упрощенно $P_d = k p \delta$ и не касаться пока процессов, происходящих в нагрузке, то и тогда система уравнений, дающих решение поставленной задачи, будет слишком сложной для непосредственного аналитического решения.

В самом деле это будет следующая система уравнений. Изменение мощности турбины под действием регуляторов будет определяться одним из уравнений.** Пусть это будет относительно простое уравнение. Тогда имеем:

I. Турбина с регулятором — (механические процессы)

$$(P_{т0} - P_T) \left[T_s p^2 + p + \frac{\beta}{T_s} \right] = \frac{P_{нт}}{\sigma T_s} p \delta. \quad (18)$$

II. Электромеханические процессы

$$\left. \begin{aligned} M p^2 \delta &= P_T - P_{вт} - k_d p \delta, \\ P_{вт} &= \frac{E'_d U}{x_d} \sin \delta - U^2 \frac{x_d - x'_d}{2x_d x'_d} \sin 2\delta, \\ E'_d &= E_d \frac{x'_d}{x_d} + U \frac{x_d - x'_d}{x_d} \sin(90 - \beta). \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

* Обычно в существующих в настоящее время в эксплуатации регуляторах напряжения имеет место только регулирование по отклонениям напряжения.

** Следует отметить, что Е. Л. Сиротинский в своей диссертационной работе для решения аналогичных (но для упрощенного частного случая) уравнений применял расчетную электрическую модель-аналогю. Однако и решение на такой модели, даже для упрощенного случая, весьма затруднительно.

Электромагнитные процессы системы возбуждения, снабженной регулятором напряжения.

$$\begin{aligned} E_d &= E_{dc} - T_o \rho E'_d, \\ E_{dc} &= E_{df} - T_o \rho E_{dc}, \\ E_{df} &= E_{per} - T_{fp} E_{df}, \\ E_{per} &= E_o + k_u (U - U_o) + k_\delta (\delta - \delta_o) + k'_u \rho U + k'_\delta \rho \delta. \end{aligned} \quad (20)$$

Решение этой системы уравнений позволит определить изменение во времени следующих величин: P_T — мощности турбины, $\rho \delta$ — относительной скорости ротора, следовательно, и частоты системы, а так же напряжения U на клеммах генератора, тока и т. д. Однако очевидно, что несмотря на все сделанные нами допущения, решение такой системы уравнений составит значительные трудности, усугубляющиеся необходимостью учета переходных процессов в других генераторах системы и ее нагрузки. Поэтому, хотя путь непосредственного решения системы операторных уравнений в ряде случаев и возможен, мы все же не можем рассматривать этот путь как рабочий, пригодный для повседневной практики. Для отыскания такого пути мы проведем дальнейшие упрощения. Прежде всего откажемся от непосредственного интегрирования исходных уравнений и перейдем к численному интегрированию, применяя так называемый *метод последовательных интервалов*.

В этом случае электрическая мощность любого из генераторов системы в любой момент времени может быть найдена по формуле:

$$\begin{aligned} P_{\text{за}} &= \frac{E_Q^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_Q E_{Q_2}}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) + \\ &+ \frac{E_Q E_{Q_3}}{Z_{13}} \sin(\delta_{13} - \alpha_{13}) + \dots + \frac{E_Q E_{Q_m}}{Z_{1m}} \sin(\delta_{sm} - \alpha_{em}). \end{aligned}$$

Э. д. с. E_Q , заменяющая генератор, находится согласно следующего выражения (для 1-го генератора):

$$E_Q = \frac{E'_d o}{1 - \frac{x_d - x'_d}{Z_{11}(u)} \cos \alpha_{j1}(u)} - \frac{U}{Z_{12}(u)} \frac{\cos(\delta_{o(u)} - \alpha_{12}(u))}{x_q - x'_d} - \frac{\cos \alpha}{Z_{11}(u)}$$

где все величины определены по отношению к напряжению U , принятому за ось отсчета (аналогично и для остальных).

Может быть также составлена система уравнений для определения E_Q , через э. д. с. E_Q, \dots, E_{Q_m} и т. д.

Э. д. с. E_d находится по E'_d и E_Q .

$$E_d = E_Q \frac{x_d - x'_d}{x_q - x'_d} - E'_d \frac{x_d - x_q}{x_q - x'_d}.$$

Система уравнений (15) решается для конечных приращений за рассматриваемый интервал времени:

$$\Delta E_{d(n)} = \frac{E_{de(n)} - E_{d(n-1)}}{T_o} \Delta t,$$

$$\Delta E_{de(n)} = \frac{E_{df(n)} - E_{df(n-1)}}{T_e} \Delta t,$$

$$\Delta E_{df(n)} = \frac{E_{per(n)} - E_{per(n-1)}}{T_f} \Delta t,$$

$$E_{per(n)} = E_o + k_u \Delta U_{(n-1)} + k_\delta \Delta \delta_{(n-1)} + k'_u \frac{\Delta U}{\Delta t} + k_\delta \frac{\Delta \delta}{\Delta t}.$$

Во многих случаях можно ограничиться учетом системы возбуждения только по уравнению (15^o), приняв экспоненциальный закон изменения с постоянной времени возбуждения возбудителя, так как это делается при обычных расчетах методом последовательных интервалов.

Приращения угла будут при этом находиться по формуле

$$\Delta \delta_n = \left(1 - \frac{\Delta t}{M} P_{d(n-1)}\right) \Delta \delta_{(n-1)} + \frac{\Delta t^2}{M} \left(1 - \frac{\Delta t P_{d(n-1)}}{2M}\right) \Delta P_{(n-1)}. \quad (21)$$

Последнее выражение (21) является расчетной формулой, могущей применяться при практических расчетах. Величина P_d , выше грубо рассматривавшаяся нами как постоянная величина, в действительности является величиной переменной, зависящей от абсолютного значения угла и от скорости изменения его.

Нагрузка электрических систем состоит в основном из осветительной и бытовой нагрузки, асинхронных двигателей и электрических печей промышленного значения.

Осветительная и бытовая нагрузка вполне обосновано может быть заменена постоянным сопротивлением или учтена по статической характеристике

$$P = P_n \left(\frac{V}{V_n}\right)^{1,65} = P_n U^{1,65}.$$

Вопрос об учете печной нагрузки решается в зависимости от типа печи; в первом приближении печная нагрузка, так же, как и бытовая, может быть заменена постоянным сопротивлением или некоторой статической характеристикой $P_n = f(u)$ или $R_n = f(u)$.

Более сложным является вопрос об учете асинхронных двигателей. В асинхронных двигателях при изменении режима происходит, вообще говоря, два вида процессов: механические, точнее, электромеханические и электромагнитные. Электромагнитные процессы не оказывают заметного влияния на относительное движение элементов системы (самих двигателей и генераторов) и поэтому ими с полным основанием можно пренебречь. Существенным оказывается только учет электромеханических процессов. Здесь мы пользуемся уравнением:

$$M_k \frac{ds}{dt} = M_c - M_{эл}, \text{ где } S = \frac{d\delta_z}{dt},$$

где M_k — постоянная инерции двигателя,

M_c — момент сопротивления,

$M_{эл}$ — электромагнитный вращающий момент двигателя.

Обозначим статический момент сопротивления $M_{ст}$.

M_n — момент сопротивления при нормальных оборотах. Тогда момент сопротивления (M_c) выражается формулой:

$$M_c = M_{ст} + (M_n - M_{ст})(1-S)^n,$$

где показатель степени n зависит от типа установки.

Вращающий момент $M_{эл}$ при обычных допущениях, которые мы не будем здесь подвергать критике, принимается равным.

$$M_{эл} = \frac{2M_{макс}}{\frac{S_k}{S} + \frac{S}{S_k}} \left[\frac{U}{U_n} \right]^2, \quad (22)$$

где S_k — критическое скольжение, соответствующее максимуму мощности двигателя, причем

$$S_k \approx \frac{R}{x_c}; \quad P_{макс} \approx \frac{U^2}{2x_c} \quad (\text{при обычных обозначениях})$$

к записанной выше системе уравнений (18, 19, 20), характеризующих переходные процессы в турбине и ее регуляторах, в генераторах и их регуляторах напряжения в системе возбуждения, мы должны добавить уравнение, характеризующее электрохимические процессы в асинхронных двигателях:

$$M_p \delta_z = S_k [M_{ст} + (M_n - M_{ст})(1-p\delta_z)^n] - \frac{2M_{макс} U^2}{S_k^2 + (p\delta_z)^2},$$

где все величины выражены в относительных единицах. Добавление такого уравнения к уже достаточно сложной системе уравнений (18—20) делает практически невозможным непосредственное интегрирование этой системы уравнения. Поэтому и в отношении учета нагрузки нам следует также обратиться к численному интегрированию, т. е. методу последовательных интервалов, применяя его аналогично тому, как это было сделано при расчетах изменения мощности генераторов.

Таким образом, метод последовательных интервалов дает возможность с достаточной полнотой учесть и поведение нагрузки при определении электрической мощности.

Подводя итоги, можем констатировать, что единственно практически приемлемым расчетным методом является метод последовательных интервалов, позволяющий найти в каждом интервале и, следовательно, в любой момент времени все значения мощностей, скоростей (скольжений) отдельных двигателей и генераторов, токов и напряжений.

В каждом интервале кроме электрических величин должна быть известна также мощность турбин с учетом регуляторов. Для введения её в вычисления последовательными интервалами необходимо решать в конечных разностях приведенные выше уравнения турбин и регуляторов.

Рассмотрим сначала простейшие из приведенных выше уравнений, а именно, уравнение (2^б). Переходя к конечным разностям, мы можем записать это уравнение в следующем виде:

$$\frac{\Delta P_{\text{пер}n}}{\Delta t} = \frac{P_{\text{ит}}}{\sigma T_s} \left(\frac{\Delta \delta}{\Delta t} \right)_{(\text{нпр})} - \beta \frac{P_{\text{пер}(n-p)}}{T_s},$$

где n — номер интервала, „ср“ — среднее скольжение за предшествующую половину интервала или, полагая

$$\Delta t_{(\text{нпр})} = \frac{\Delta \delta_n}{360 f}; \quad P_{\text{пер}(\text{нпр})} = P_{\text{пер}(n-1)} + \frac{\Delta P_{\text{пер}(n)}}{2},$$

получим

$$\Delta P_{\text{пер}(n)} = \frac{P_{\text{ит}}}{\sigma T_s} \cdot \frac{\Delta \delta}{360 f} - \beta \frac{P_{\text{пер}(n-1)} + \frac{\Delta P_{\text{пер}(n)}}{2}}{T_s} \Delta t;$$

отсюда нетрудно найти интересующее нас значение:

$$\Delta P_{\text{пер}(n)} = \frac{P_{\text{ит}}}{\sigma \left(T_s + \frac{\Delta t}{2} \beta \right)} \frac{\Delta \delta_n}{360 f} - \frac{\Delta t \beta}{\left(T_s + \frac{\Delta t}{2} \beta \right)} P_{\text{пер}}.$$

Таким образом, мы имеем возможность найти приращение мощности в любой интервал времени и связать уравнение изменения мощности турбины с уравнениями электромеханического и электромагнитного процесса, получая полную картину переходного процесса в электрической системе.

В случае учета механических процессов в турбине и их регуляторов по формулам, отражающим большее количество влияющих факторов, чем приближенная формула (2^б), методика расчета осложняется, оставаясь все же, как будет показано в следующей статье, практически приемлемой.

В ы в о д ы

Настоящая работа позволила установить методику расчета любых переходных процессов в энергетической системе, рассматриваемой как единое целое, включая сюда электрическую часть (генераторы, сеть, нагрузка), механическую часть (турбина, регуляторы скорости или регуляторы частоты), гидромеханическую часть (учет влияния гидравлического удара).

Такое комплексное рассмотрение процесса, разумеется, далеко не всегда необходимо, но в ряде случаев такой подход является

единственно возможным для получения приемлемых с практической точки зрения результатов.

Одной из главных задач, которые должны быть разрешены при продолжении этой работы, будет установление границ, определение группы задач, при которых необходим учет переходных процессов во всех электрических, механических и гидромеханических элементах энергетической системы и установление случаев, когда возможно и когда следует пренебрегать теми или иными процессами.

Второй задачей является уточнение методики расчета, разработанной автором (основные положения этой методики изложены в настоящей статье). Это касается, в первую очередь, вопросов учета гидравлического удара, вопросов учета регуляторов частоты различных типов, уточнения уравнений цепей возбуждения и регуляторов напряжения и, наконец, уточнения вопроса о влиянии насыщения.

Здесь же, в процессе этих уточнений, должен быть более детально рассмотрен вопрос о системах со слабой и сильной связью (вопрос, рассмотренный автором в предыдущей работе, а также еще раньше в статье, написанной совместно с П. С. Ждановым и опубликованной в журнале „Электричество“).

Далее, для расширения возможностей практического использования результатов настоящего исследования необходима большая работа в следующих направлениях:

а) уточнение параметров регуляторов скорости турбин и регуляторов частоты, имеющих в системах;

б) уточнение параметров электрических регуляторов напряжения схем компаундирования и т. д.;

в) уточнение полученных в настоящей работе общих уравнений, для чего необходимы исследования влияющих факторов, как теоретические, так и экспериментальные;

г) уточнение вопроса об учете изменения угловой скорости в уравнениях мощности, возможности введения допущения $P=M$;

д) в соответствии с результатами уточнений, указанных выше, необходимо провести работу по уточнению и одновременно упрощению методов решения полученных уравнений.

Это касается как методики решения последовательными интервалами, где можно применить вспомогательные номограммы, кривые и таблицы, так и методики аналитического решения, которая, в отдельных частных случаях, может быть с успехом проведена.

Такое аналитическое решение потребует, очевидно, весьма существенных упрощений и допущений. Но если эти последние будут разумно оценены, то такие решения могут быть исключительно полезны для установления общих закономерностей и общего анализа процессов в системе и в ряде случаев для конкретных целей при решении практических задач.

Этот вопрос рассмотрим в следующей статье.

П р и л о ж е н и е

Результаты решения уравнений, описывающих поведение системы

Непосредственное интегрирование уравнений поведения системы, с учетом происходящих в ней электрических, электромеханических и гидродинамических процессов, возможно только при наличии упрощающих допущений. Здесь можно идти следующими путями:

а) можно принять мощность или вращающий момент турбины постоянными, отбросив при этом все механические процессы. Так мы приходим к методике, применяемой в расчетах устойчивости электрических систем.

Если при этом отказаться от решения нелинейных уравнений и аппроксимировать тригонометрические функции какой-либо зависимостью, то в ряде случаев возможно найти обычно интересующие инженера значения f , δ , U , J , P в виде аналитических зависимостей от времени.

б) Можно принять постоянной электрическую мощность, или электрический момент генераторов и при таких условиях искать зависимость частоты и мощности турбины от времени.

в) Можно, наконец, задать тот или иной закон изменения электрической мощности в зависимости от скорости аппроксимировать трансцендентные зависимости приближенными аналитическими выражениями.

Эти вопросы более подробно будут рассмотрены в следующей статье; здесь мы проведем только некоторые предварительные исследования.

Разберем некоторые частные случаи поставленной задачи.

1. Если регуляторы турбины не действуют, и её мощность остается постоянной, то при набросе или сбросе мощности происходит непрерывный рост частоты системы:

$$M \frac{ds}{dt} = M_{\text{мех}} - M_{\text{эл}} \approx \Delta P \quad \begin{array}{l} M_{\text{мех}} = \text{const}, \\ M_{\text{эл}} = \text{const}. \end{array}$$

Тогда имеем:

$$S = \frac{\Delta P}{M} t \equiv \Delta f.$$

Частота растет пропорционально времени, интенсивность возрастает пропорционально отношению наброса (ΔP) к суммарной, приведенной инерции системы.

2. Если при отсутствии регулирования механической мощности принять, что электрическая мощность изменяется по следующему закону:

$$P_{\text{эл}} = P_0 (1 + S) \pm \Delta P = P_0' + P_0 S, \text{ где } P_0' = P_0 \pm \Delta P,$$

то дифференциальные уравнения изменения скольжения принимают вид:

$$M \frac{ds}{dt} - P_{\text{мех}} + P_0 + P_0 S = 0,$$

$$M \frac{ds}{dt} + P_0 S \pm \Delta P = 0.$$

$$\text{Обозначим } T = \frac{M}{P_0}; \quad \text{тогда } \Delta f \equiv S = \frac{\Delta P}{P_0} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right).$$

т. е. происходит нарастание частоты по экспериментальной зависимости, причем при некотором значении электрической мощности, увеличивающейся с ростом частоты, наступает установившийся режим. Отклонение частоты определяется величиной наброса мощности.

3. Оценка эффекта регулятора напряжения. Действие регулятора напряжения сводится к увеличению электрической мощности. Это при сделанных допущениях означает, что благодаря действию регулятора напряжения при сбросе нагрузки отклонение частоты будет уменьшаться, процесс же изменения частоты будет идти быстрее.

4. Если отразить действие регуляторов и изменение механической мощности уравнением (2⁶) и одновременно принять $P_{\text{эл}} = \text{const}$, то мы приходим к следующей системе уравнений:

$$\frac{dP_{\text{пер}}}{dt} = \frac{sP_{\text{нр}}}{\sigma T_s} - \frac{P_{\text{пер}}}{T_s} \quad \text{и} \quad M \frac{ds}{dt} + P_{\text{эл}} - P_T = 0,$$

$$P_{\text{пер}} = P_0 - P_T, \quad P_T = P_0 - P_{\text{пер}}; \quad \beta = 1.$$

Пусть $P_{\text{эл}}$ изменилось скачком на величину $\pm \Delta P$; тогда

$$M \frac{ds}{dt} + P_{\text{эл}} \pm \Delta P - P_0 + P_{\text{пер}} = 0,$$

но $P_{\text{эл}} = P_0$

следовательно, $M \frac{ds}{dt} + P_{\text{пер}} \pm \Delta P = 0,$

где $\Delta P = \text{const}$.

Из этого уравнения определяем $P_{\text{пер}}$:

$$P_{\text{пер}} = -M \frac{ds}{dt} \pm \Delta P; \quad \frac{dP_{\text{пер}}}{dt} = -M \frac{d^2s}{dt^2}.$$

Следовательно уравнение (2⁶) может быть переписано так:

$$-M \frac{d^2s}{dt^2} = \frac{sP_{\text{нр}}}{\sigma T_s} + M \frac{ds}{T_s dt} \pm \frac{\Delta P}{T_s},$$

откуда имеем:

$$\Delta f \equiv S = \frac{\sigma \Delta P}{P_{\text{нр}}} + \frac{\sigma \Delta P}{P_{\text{нр}}} \frac{1}{2\sqrt{1-q}} [(1 - \sqrt{1-q}) e^{\alpha_1 t} - (1 + \sqrt{1-q}) e^{\alpha_2 t}],$$

где

$$q = \frac{4T_s}{\sigma} \frac{P_{нр}}{M}; \quad \alpha_{1,2} = -\frac{1}{2T_s} \left(1 \pm \sqrt{1-q} \right).$$

Очевидно, что установившееся изменение частоты будет равно:

$\Delta f = \pm \frac{\sigma \Delta P}{P_{нр}}$, т. е. будет пропорционально коэффициенту неравномерности σ величине наброса мощности, отнесенного к мощности системы.

Полученной зависимости можно, как известно, придать и другой вид:

$$\Delta f = \pm \frac{\sigma \Delta P}{P_{нр}} - 2e^{-\frac{1}{2T_s} t} \sqrt{A^2 + B^2} \Delta P \cos(\omega t + \varphi),$$

где

$$A = \frac{\sigma}{2P_n},$$

$$B = \frac{1}{2\omega M} \left[\frac{\sigma M}{2P_n} - 1 \right],$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{T_s - \frac{\sigma M}{2P_n}}{2T_s \omega A M},$$

$$\omega = \frac{1}{T_s} \sqrt{\frac{P_n T_s}{\sigma M} - 0,25}.$$

Изменение частоты будет, следовательно, состоять из постоянной, составляющей $\frac{\sigma \Delta P}{P_{нр}}$ (установившегося изменения Δf) и переходного (свободного) изменения, происходящего в зависимости от соотношения параметров аperiodических или с колебаниями частотой, постепенно затухающим с постоянной времени T_s (см. рис 5). Если принять, что электрическая мощность $P_n = P_0(1+s)$, т. е., что рост частоты приводит к возрастанию электрической мощности, то легко установить, что характер изменения частоты остается таким же, но постоянная времени T_s принимает значение $T'_s = T_s \frac{M}{M+P_s T_s}$, т. е. происходит более быстрое затухание колебаний частоты, причем меньше M , тем заметнее это явление. Частота колебаний при этом увеличивается тем заметнее, чем меньше M . При больших M это влияние ничтожно:

$$\omega = \sqrt{\frac{P_n}{T_s \sigma M} - \frac{1}{4} \left[\frac{1}{T_s} - \frac{P_s}{M} \right]^2}.$$

В заключение приведем результаты некоторых расчетов* и сопоставим их с данными эксперимента.

На рис. 2 показано изменение частоты при набросе нагрузки. Расчет проведен методом последовательных интервалов при упрощенном учете регуляторов напряжения и при замене нагрузки постоянным сопротивлением. Регулирование турбины учтено согласно уравнения.

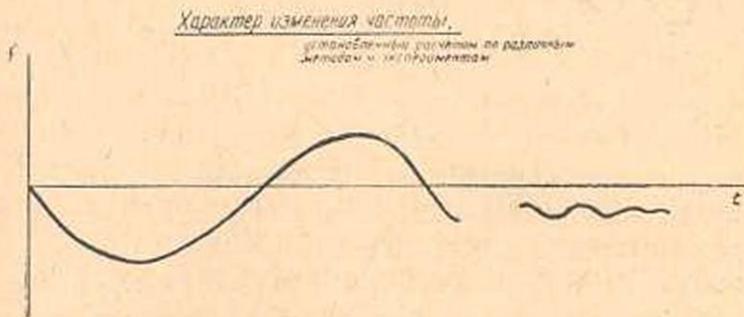


Рис. 2.

На рис. 3 показано то же изменение частоты, но при учете переменного скольжения двигателей и учете регулирования турбин по уравнению (18), а также при учете в последнем уравнении того обстоятельства, что $P \neq M$.

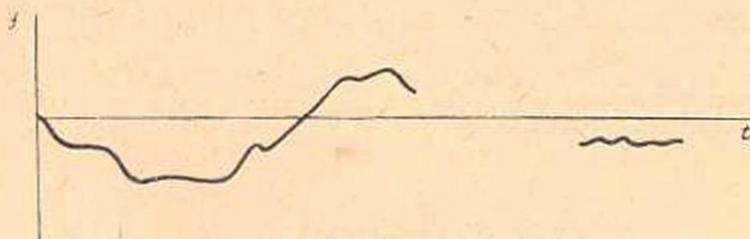


Рис. 3.

На рис. 4 показаны результаты расчета упрощенным методом в предположении, что $P_{эл} = (1+S)$.

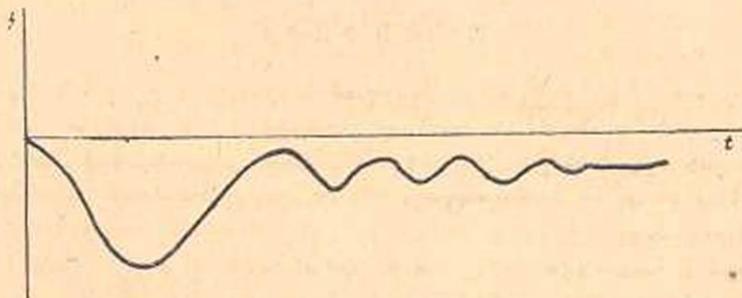


Рис. 4.

* Проводились при участии канд. техн. наук Л. А. Жукова.

Рис. 5 показывает то же изменение, полученное на основании эксперимента.*

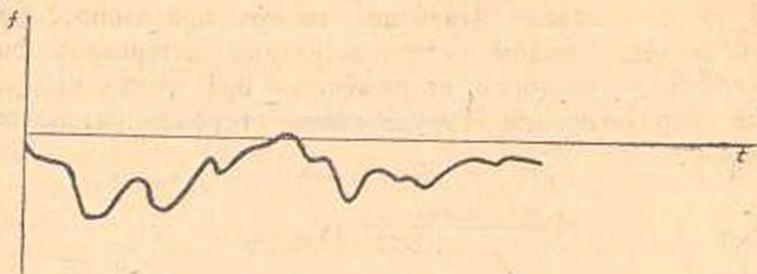


Рис. 5.

Приведенные на этих рисунках результаты мы не будем подвергать подробному разбору, поскольку они носили только предварительный характер и имели целью выявление качественной картины процесса. Расчетные параметры здесь подбирались так, чтобы возможно ближе подойти к результатам, полученным экспериментально.

Сопоставление с экспериментом здесь весьма ориентировочно, ибо не были известны все параметры исследуемой системы и её регуляторов.

Более серьезное количественное сопоставление результатов, получаемых аналитически при различных допущениях и экспериментально — дело дальнейшего развития настоящей работы.

Гидро-электрическая лаборатория
Водно-энергетического института
Академии наук Армянской ССР

Վ. Ս. Վենիկով

**ԷԼԵԿՏՐՈՎՈԼՏԱԿԱՆ ՄԻՍՏԵՄՆԵՐԻ ՄԵՋ ՀՁՈՐՈՒՅՅՈՒՆ ԻՋԵՑՄԱՆ
ԵՎ ԲԱՐՁՐԱՑՄԱՆ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ**

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոդվածում քննության են առնված հզորության իջեցման և բարձրացման դեպքում (բեռնվածքի կամ դեներացիայի հզորության փոփոխում) էլեկտրական սխեմաների մեջ աեղի ունեցող պրոցեսների կոմպլեքսը և նրանց հետ կապված հաճախականության, լարվածության և հոսանքի փոփոխությունները:

Փորձ է կատարված մալ հաշվարկման մեթոդ, որը հաշվի է առնում դեներատորների էլեկտրական հզորության փոփոխումը ոչ ստացիոնար

* По данным опытов, проводившихся в системе Арменэнерго.

պրոպեւի դեպքում, որը տեղի ունի հղորութեան իջեցման և բարձրացման նեոնանքով, արագութեան կանոնադրիչների ազդեցութեան ներքո, հաշվի առնելով տարրինի մեխանիկական հղորութեան փոփոխումը (այդ դեպքում մոտավորապես հաշվի են առնվում նաև հիդրավիլիկական հարվածի նեո կապված երևույթները) և հաշվի առնելով բեռնվածքի շարժիչների ընթացքն ու կենցաղային սպառողների բնութագրերը: Հաճախականութեան զգալի փոփոխութեանների դեպքում անհրաժեշտ է լինում հաշվի առնել ասինխրոն մոմենտները, որոնք պայմանավորված են դեմպֆերային փաթաթաններով, զրգոման փաթաթանով առաջարկված մեթոդիկան հաշվի է առնում նաև այդ ֆախտորները:

Նկարագրված են հեղինակի կատարած անալիտիկ հետազոտութեանների մի քանի արդյունքները, կատարված Հայկական ՍՍՌ ԳԱ իսկական անդամ, պրոֆ. Ն. Վ. Եզիազարովի նախաձեռնութեամբ:

Դրանք նպատակ ունեն ցույց տալ, որ թվային ինտեգրում կիրառելու դրա հիմնված հաշվարկման առաջարկված մեթոդիկան կարող է տալ պրոպեւի պատկերը, որը քանակապես և որակապես մտանում է փորձնականորեն ստացված արդյունքներին:

Անալիտիկ և փորձնական հետազոտութեան արդյունքների մանրամասն քանակական համեմատութեանն առաջիմ դժվար է, շնորհիվ իրական սխառեմի պարամետրների մասին թերի անզեկութեանների, այն սխառեմի, որի մեջ կատարվել են որպես սառուղիչ ընդունված փորձերը:

Տվյալ աշխատանքը նպատակ ունի տալ խնդրի դրվածքը և նշում է նրա լուծման ուղիները:

Աշխատանքում ընդունված ելման դրույթների և նեթադրութեանների հետադաճ ճշգրտումը կգարգացվի հաջորդ հոդվածներում, որոնք կարտահայտեն հեղինակի ներկայումս կաարվող հետազոտութեանների արդյունքները և կգարգացնեն սվյալ աշխատանքը:

