

Л. А. КРУММ

**Уравнения стационарного режима электрической системы  
с учетом статических характеристик нагрузок и  
генераторов при автоматическом регулировании частоты,  
напряжения и мощности**

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
ТАЛЛИН, 1957



Ер. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО  
ИНСТИТУТА

Серия А

№ 123

1957

Л. А. КРУММ

**Уравнения стационарного режима электрической системы  
с учетом статических характеристик нагрузок и  
генераторов при автоматическом регулировании частоты,  
напряжения и мощности**

Ер. 977

ENSV Teaduste Akadeemia  
Keskraamatukogu

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
ТАЛЛИН, 1957



## ВВЕДЕНИЕ

Соединение электрических систем в единую высоковольтную сеть СССР связано с полной автоматизацией регулирования частоты, напряжения и мощности. При этом расчет стационарных режимов электрических систем становится более сложным, что требует соответствующего развития и методики расчета.

Существующие методы расчета являются весьма упрощенными. Они не учитывают т. н. статических характеристик мощностей, т. е. зависимости активной и реактивной нагрузочных и генерируемых мощностей узловых точек от частоты и напряжения узловой точки системы. Также предполагается обычно, что в системе в так называемой точке балансирования мощностей имеется только одна станция, регулирующая частоту. Однако, в современных и особенно в единой электрической системе имеется любое число станций, регулирующих частоту, между которыми толчки нагрузки распределяются в определенной пропорции на основе разных методов автоматического регулирования частоты с учетом ограничения перетоков мощностей слабых электрических связей.

При расчете стационарных режимов единой электрической системы те или иные факторы, которыми обычно пренебрегают, могут оказать в большей или меньшей степени существенное влияние на результаты расчета в зависимости от цели расчета и исследуемого режима. В связи с этим становится необходимым, с одной стороны, определение области использования существующих упрощенных методов, а с другой, разработка новых упрощенных методов в зависимости от цели расчета и исследуемого режима, когда существующие упрощенные методы оказываются непригодными. Эта задача может быть решена в самом общем и систематизированном виде только на основе общей методики,

учитывающей все отмеченные выше факторы, не учитываемые существующими упрощенными методами.

Общая методика должна допускать определение как стационарного режима при заданных его уравнениях, так и изменений стационарного режима в результате любых возмущений симметричного характера. Эти возмущения могут появляться в виде включения и отключения нагрузок и генераторов, в виде изменения их параметров (выражается в изменении характеристик мощностей уже включенных в работу нагрузок и генераторов), а также в виде изменения сетевых параметров (например, отключение линии электропередачи или трансформатора, изменение степени компенсации длинной линии переменного тока).

Определение изменений стационарного режима оказывается важным не только для более простого определения стационарного режима, установившегося вслед за любым возмущением, но также и для расчета статической устойчивости сложной системы на основе метода малых возмущений, и для вычисления в общем виде критериев для экономического распределения генерируемых мощностей узловых точек.

Из общей методики можно вывести новые упрощенные методы расчета в результате сознательного пренебрежения несущественными факторами с точки зрения цели расчета и исследуемого режима системы.

С точки зрения общей методики статические характеристики генерируемых мощностей необходимо определить с учетом влияния автоматических регуляторов частоты, напряжения и мощности.

Следовательно, рассматриваемая общая методика расчета стационарных режимов электрических систем должна обеспечить определение стационарного режима при заданных его уравнениях, а также изменений стационарного режима при любых возмущениях симметричного характера, с учетом статических характеристик нагрузок и генераторов при автоматическом регулировании частоты, напряжения и мощности.

Методы расчета стационарных режимов электрических систем с учетом статических характеристик нагрузок и генераторов при автоматическом регулировании напряжения и только при первичном автоматическом регулировании частоты в смысле общности методики и трудоемкости вычис-

лительных операций еще недостаточно разработаны. Как автору известно, эти методы рассматриваются только в работах Х. Ф. Фазылова, применительно к расчету т. н. самоустанавливающихся режимов [1], которое представляет интерес в основном как методика определения стационарного режима при заданных уравнениях, а также И. С. Брука и И. М. Марковича, применительно к вычислению т. н. практических критериев статической устойчивости [2], которое представляет интерес как методика определения изменений режима при симметричных возмущениях в узловых точках.

В общем случае при регулировании напряжения и вторичном автоматическом регулировании частоты и мощности эти методы совсем еще не разработаны.

Настоящая статья является первой из ряда статей, излагающих общую методику, в которых сделана попытка устранить вышеотмеченные недостатки. Основные моменты этой работы были разработаны еще в Томском политехническом институте под руководством проф. д. т. н. В. К. Щербакова [3]. В Таллинском политехническом институте эта работа получила дальнейшее развитие.

Более детальное решение отдельных узлов этой методики, а также вытекающие из этой методики новые упрощенные методы в зависимости от цели расчета и исследуемого режима будут изложены в последующих работах.

Решение поставленной задачи заключается в выборе формы общих уравнений стационарного режима и методики их решения. Особое внимание следует обратить на уменьшение трудоемкости вычислительного процесса при помощи выбора рациональной методики, а также автоматизации вычислительного процесса. Из этих вопросов рассматривается в настоящей статье только выбор формы общих уравнений стационарного режима.

## **А. УРАВНЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ**

Форма общих уравнений стационарного режима электрической системы зависит от формы уравнений отдельных элементов системы — нагрузок, генераторов, электрической сети. Уравнения отдельных элементов системы даются в форме уравнений узловых мощностей как функции параметров режима электрической системы.

## 1. Уравнения нагрузочных и генерируемых мощностей

Известно, что активная и реактивная нагрузочные мощности какой-либо узловой точки являются функциями частоты  $f$  и напряжения узловой точки  $U$ :

$$P_n = P_n(f, U) \text{ и } Q_n = Q_n(f, U). \quad (1)$$

На основе уравнений генератора, возбудителя, автоматического регулятора напряжения и регулятора скорости легко доказать, что и активную и реактивную генерируемые мощности какой-либо узловой точки при автоматическом регулировании напряжения и только при **первичном автоматическом регулировании частоты** можно также представить функциями частоты и напряжения узловой точки:

$$P_g = P_g(f, U) \text{ и } Q_g = Q_g(f, U). \quad (2)$$

Также можно доказать, что при автоматическом регулировании напряжения и **вторичном автоматическом регулировании частоты** генерируемую реактивную мощность какой-либо узловой точки, где имеется регулирующая частоту станция, можно рассматривать как функцию частоты, напряжения и генерируемой активной мощности этого узла:

$$Q_g = Q_g(f, U, P_g). \quad (3)$$

В свою очередь, активную генерируемую мощность этого узла можно представить как функцию вместо или кроме частоты и напряжения еще от некоторых новых параметров режима:

$$P_g = P_g(X_1, \dots, X_n). \quad (4)$$

Зависимость (4) определяется на основе критериев регулирования частоты. Так например, в случае регулирования по комбинированным критериям (см. [4]):

$$\frac{\Delta f}{f_0} + \frac{P_{gi} - P_{rzi}}{P_{rzi}} \frac{1}{K_{pi}} + \Delta t_{\Sigma} \frac{1}{K_{ti}} = 0, \quad (5)$$

где  $\Delta t_{\Sigma} = \int_{t_0}^t \frac{\Delta f}{f_0} dt$ ,  $n$  регулируемыми станциями функ-

ция активной мощности регулирующей станции №  $i$  определяется на основе критериев регулирования (5) всех регулирующих станций ( $i=1, \dots, n$ ):



$$P_{гi} = P_{гzi} - \frac{K_{Pi}}{K_{ti}} P_{гni} \frac{\sum_{i=1}^n P_{гzi} - P_{г\Sigma}}{\sum_{i=1}^n \frac{K_{Pi}}{K_{ti}} P_{гni}} . \quad (6)$$

Новым параметром режима в (6) является суммарная активная мощность всех регулирующих станций:

$$P_{г\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_{гi} .$$

В таблице № 1 приведены параметры режима  $X_1, \dots, X_n$  (см. (4)), от которых зависит генерируемая активная мощность регулирующей станции  $P_{г}$  в зависимости от всех основных современных методов автоматического регулирования частоты и режима системы. Обычно  $P_{г}$  зависит только от одного нового параметра режима — самой мощности  $P_{г}$  или частоты  $f$  или угла  $\delta$ . Только в случае 3 таблицы № 1  $P_{г}$  зависит от нескольких параметров режима в зависимости от режима системы.

**При автоматическом регулировании генерируемой активной мощности** активная мощность  $P_{г}$  станции, регулирующей мощность, оказывается в каждый рассматриваемый момент фиксированной. Следовательно, на основе (3) генерируемая реактивная мощность оказывается только функцией частоты и напряжения.

Уравнения (1), (2) и (3) или т. н. статические характеристики мощностей можно определить или экспериментально, или аналитически.

**В первом случае** выделяются отдельные генераторы и нагрузки для регулирования параметров режима  $f, U$  и  $P_{г}$  нагрузок, генераторов или целых станций, характеристики мощности которых необходимо определить. При помощи измерения мощностей и регулируемых параметров режима можно построить графические зависимости этих мощностей от любого одного параметра при разных значениях остальных параметров режима. Статические характеристики следует снять для типичных нагрузок и генераторов при их типичных режимах работы, поскольку эти характеристики оказываются подобными независимо от номинальных мощностей, определяемых при номинальных параметрах режима.

## Параметры

режима, от которых зависит генерируемая активная мощность регулирующей станции  $P_r$  в зависимости от метода автоматического регулирования и режима системы

№№ п/п.	Название метода регулирования	Параметры режима
1.	Регулирование одной регулирующей станцией аста-тически по активной мощности [4].	Активная мощность регулирующей станции $P_r$ .
2.	Регулирование несколькими регулируемыми станциями статически по их активной мощности [4].	Частота $f$ .
3.	Регулирование по виртуальному ста-тизму [4].	Суммарная активная мощность всех регулирующих станций $P_{r\Sigma}$ .
4.	Регулирование по комбинированному критерию [4].	Частота $f$ и напряжения регулирующих станций, не имеющих резерва $U_1, \dots, U_k$ .
		Суммарная активная мощность всех регулирующих станций $P_{r\Sigma}$

5.	<p>Регулирование частоты объединенных систем статически по обменному потоку активной мощности [4].</p>	<p>В каждой системе имеется одна регулирующая станция.</p>	<p>Активная мощность регулирующих станций <math>P_r</math></p>
6.	<p>Регулирование по отклонению вектора напряжения от эталонного вектора напряжения [5].</p>	<p>В каждой системе имеются несколько регулирующих станций, между которыми функции регулирования распределяются по методу виртуального статизма или по комбинированным критериям регулирования.</p>	<p>Активная мощность регулирующей станции <math>P_r</math> или угол <math>\delta</math> в зависимости от критерия регулирования.</p>
Двойное регулиро-	<p>Экономичное распределение мощностей осуществляется во всей объединенной системе.</p>	<p>Экономичное распределение мощностей осуществляется только внутри отдельных систем объединенной системы.</p>	<p>Суммарная активная мощность регулирующих станций объединенной системы <math>P_{r\Sigma}</math>.</p>
			<p>Суммарная активная мощность регулирующих станций отдельной системы <math>P_{rj}</math>.</p>

Это обстоятельство позволит построить в относительных единицах стандартные характеристики, которые оказываются пригодными при любых номинальных мощностях.

**Во втором случае** уравнения (1), (2) и (3) вычисляются аналитически. Этот путь оправдывается только в случае генераторов, так как, во-первых, вычисление генерируемых мощностей проще, чем вычисление нагрузочных мощностей крупной нагрузки, состоящей из большого количества более мелких разнообразных нагрузок и, во-вторых, функции генерируемых мощностей сами зависят еще от заданных характеристик автоматических регуляторов скорости и напряжения, изменения которых проще учитывать аналитическими зависимостями.

Единственную некоторую неопределенность внесет в определение статических характеристик мощностей зона нечувствительности автоматических регуляторов и неточность телеизмерительных установок. Но значение этих факторов постоянно снижается в связи с усовершенствованием автоматических регуляторов скорости и частоты (см. [7]) и телеизмерительных установок. У современных регуляторов зона нечувствительности незначительная.

Экспериментальному и аналитическому определению статических характеристик нагрузочных и генерируемых мощностей при автоматическом регулировании частоты, напряжения и мощности будет посвящена отдельная работа.

## 2. Уравнения электрической сети

Электрическая сеть состоит из электрических связей переменного и иногда постоянного тока, связывающих отдельные узловые точки, к которым подключены в общем случае как нагрузочные, так и генерируемые мощности.

Уравнения электрической сети могут быть выражены в двух разных формах:

**В первой форме** эти уравнения представляются в виде уравнений активной и реактивной мощностей в начале и в конце электрических связей.

В случае электрических связей **переменного тока** активная и реактивная мощности в начале электрической связи являются функциями частоты (через реактивные сопротивления связи), напряжения, реактивной и активной мощностей в конце связи:

$$P_{л1} = P_{л1}(f, U_2, P_{л2}, Q_{л2}); Q_{л1} = Q_{л1}(f, U_2, P_{л2}, Q_{л2}). \quad (7)$$

Эти же уравнения могут быть выражены и в форме потерь активной и реактивной мощностей электрической связи:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{пот}} &= P_{л1} - P_{л2} = P_{\text{пот}}(f, U_2, P_{л2}, Q_{л2}) \\ Q_{\text{пот}} &= Q_{л1} - Q_{л2} = Q_{\text{пот}}(f, U_2, P_{л2}, Q_{л2}) \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Уравнениям (8) необходимо еще добавить уравнение, определяющее связь между напряжениями в начале и в конце связи:

$$U_1 = F(f, U_2, P_{л2}, Q_{л2}). \quad (9)$$

В случае электрических связей **постоянного тока** их уравнения представляются в виде уравнений мощностей обоих концов связи. При этом мощности в начале связи можно рассматривать как дополнительные нагрузочные мощности в прилегающей узловой точке. Аналогично, мощности в конце связи можно рассматривать как дополнительные генерируемые мощности прилегающей узловой точки.

Если электрическая связь или звено постоянного тока используется для **автоматического регулирования частоты и напряжения** одной из прилегающих систем статически соответственно по активной и реактивной мощности одного конца связи [8], то активные и реактивные мощности в начале и в конце связи зависят от частоты и напряжения обоих концов связи:

$$\left. \begin{aligned} P_{л1} &= P_{л1}(f_1, f_2, U_1, U_2); Q_{л1} = Q_{л1}(f_1, f_2, U_1, U_2) \\ P_{л2} &= P_{л2}(f_1, f_2, U_1, U_2); Q_{л2} = Q_{л2}(f_1, f_2, U_1, U_2) \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Если же электрическая связь постоянного тока используется для **автоматического регулирования активной мощности** одного конца связи [8], например, конца связи  $P_{л2}$ , то уравнения (10) можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} P_{л1} &= P_{л1}(P_{л2}, f_1, f_2, U_1, U_2); Q_{л1} = (P_{л2}, f_1, f_2, U_1, U_2) \\ P_{л2} &= P_{л2} \qquad \qquad \qquad ; Q_{л2} = (P_{л2}, f_1, f_2, U_1, U_2) \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

где новым параметром режима связи является  $P_{л2}$ . В случае автоматического регулирования активной мощности одного конца связи, последнюю, например  $P_{л2}$ , можно рассматривать в каждый данный момент времени как фиксированную величину. В результате этого мощности конца и

начала связи зависят также только от частоты и напряжения обеих концов связи.

Наконец, если электрическая связь постоянного тока используются для **регулирования частоты одной из прилегающих систем совместно с остальными станциями**, регулирующими частоту в данной системе на основе общих критериев регулирования, то уравнения электрической связи имеют также вид (11), где активная мощность одного конца связи, например  $P_{л2}$ , можно представить функцией некоторых новых параметров режима в зависимости от метода регулирования частоты, также как в случае  $n$  действительных регулирующих станций (4).

**Во второй форме уравнения электрической сети** представляются в виде уравнений сетевых узловых мощностей, т. е. активных и реактивных мощностей, передаваемых из узловых точек в электрическую сеть переменного тока. Сетевые узловые активные и реактивные мощности можно представить в виде функций сетевых параметров режима, т. е. частоты  $f$ , напряжений всех узловых точек  $U_1, \dots, U_M$  и взаимных углов между векторами напряжения первого и всех остальных узлов  $\delta_{12}, \dots, \delta_{1M}$ :

$$\left. \begin{aligned} P_i &= P_i(f, U_1, \dots, U_M, \delta_{12}, \dots, \delta_{1M}) = \\ &= \frac{U_i^2}{Z_{ii}} \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq i}}^{s=M} \frac{U_i U_s}{Z_{is}} \sin(\delta_{is} - \delta_{1i} - \alpha_{is}) \\ Q_i &= Q_i(f, U_1, \dots, U_M, \delta_{12}, \dots, \delta_{1M}) = \\ &= \frac{U_i^2}{Z_{ii}} \cos \alpha_{ii} - \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq i}}^{s=M} \frac{U_i U_s}{Z_{is}} \cos(\delta_{is} - \delta_{1i} - \alpha_{is}) \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

где  $\left. \begin{matrix} i \\ s \end{matrix} \right\} = 1, \dots, M$  — номер последовательности узла,  
 $\dot{Z}_{ii} = Z_{ii} \angle (90^\circ - \alpha_{ii})$  — собственный импеданс узла №  $i$ ,  
 $\dot{Z}_{is} = Z_{is} \angle (90^\circ - \alpha_{is})$  — взаимный импеданс между узлами №  $i$  и №  $s$ ;

$\dot{Z}_{ii}$  и  $\dot{Z}_{is}$  являются сложными функциями частоты.

Уравнения или статические характеристики электрической сети можно вычислить аналитически.

## В. УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Соответственно двум формам уравнений электрической сети уравнения электрической системы могут быть выражены в двух формах.

### 1. Первая форма уравнений

В первой форме уравнения электрической системы представляются в виде уравнений баланса активных и реактивных мощностей во всей системе вместе с уравнениями, определяющими связь между напряжениями в начале и в конце электрических связей и баланс активных и реактивных мощностей узловых точек.

Эта форма уравнений окажется приемлемой с точки зрения трудоемкости вычислительной работы только в случае двух узловых точек, связанных электрической связью переменного тока (см. рис. 1).

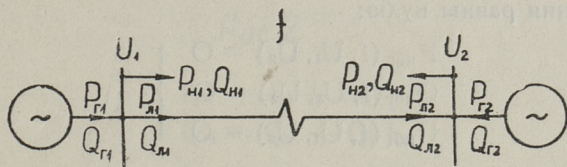


Рис. 1

При автоматическом регулировании напряжения и **первичном автоматическом регулировании частоты** эта форма уравнений имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} P_{Г1} + P_{Г2} &= P_{Н1} + P_{Н2} + P_{\text{пот}} \\ Q_{Г1} + Q_{Г2} &= Q_{Н1} + Q_{Н2} + Q_{\text{пот}} \\ U_1 &= F_1(f, U_2) \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

где

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{пот}} &= P_{\text{пот}}(f, U_2), \quad Q_{\text{пот}} = Q_{\text{пот}}(f, U_2) \\ U_1 &= F_1(f, U_2) \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

так как в уравнениях (8) и (9) активную и реактивную мощности в конце электрической связи можно выразить функциями частоты и напряжения в конце связи:

$$\left. \begin{aligned} P_{л2} &= P_{н2} - P_{г2} = P_{л2}(f, U_2) \\ Q_{л2} &= Q_{н2} - Q_{г2} = Q_{л2}(f, U_2) \end{aligned} \right\}. \quad (15)$$

Уравнения (13) определяют полностью три неизвестных параметров режима системы: частоту  $f$  и напряжения обеих узлов  $U_1$  и  $U_2$ .

Эти уравнения желательно представить иначе.

Обозначим функциями небаланса активных и реактивных мощностей во всей системе и неравенства напряжения в начале электрической связи от частоты  $f$  и напряжений  $U_1$  и  $U_2$  функции:

$$\left. \begin{aligned} P_{нбг} &= P_{нбг}(f, U_1, U_2) = P_{г1} + P_{г2} - (P_{н1} + P_{н2} + P_{пот}) \\ Q_{нбг} &= Q_{нбг}(f, U_1, U_2) = Q_{г1} + Q_{г2} - (Q_{н1} + Q_{н2} + Q_{пот}) \\ U_{нб1} &= U_{нб1}(f, U_1, U_2) = U_1 - F_1(f, U_2) \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

и тогда параметры режима системы  $f$ ,  $U_1$ ,  $U_2$  определяются условием, что функции небаланса мощностей и неравенства напряжения равны нулю:

$$\left. \begin{aligned} P_{нбг}(f, U_1, U_2) &= 0 \\ Q_{нбг}(f, U_1, U_2) &= 0 \\ U_{нб1}(f, U_1, U_2) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

Эти уравнения называются уравнениями небаланса мощностей во всей системе и неравенства напряжения в начале электрической связи.

При вторичном автоматическом регулировании частоты единственная разница заключается в том, что вместо неизвестной частоты  $f$  появляется в уравнениях (17) новый неизвестный параметр режима, обычно активная генерируемая мощность регулирующей станции  $P_g$  или суммарная активная мощность всех регулирующих станций  $P_{г\Sigma}$ .

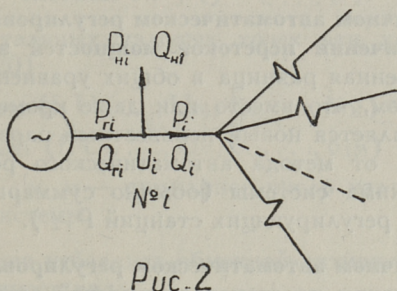
Если параллельно с электрической связью переменного тока имеется еще электрическая связь постоянного тока, который принимает участие в автоматическом регулировании частоты, напряжения и мощности, то сохраняется форма уравнений (17), так как мощности в начале и в конце электрической связи постоянного тока можно рассматривать как дополнительные нагрузочные и генерируемые мощности узловых точек.



## 2. Вторая форма уравнений

Во второй форме уравнения электрической системы представляются в виде уравнений баланса активных и реактивных мощностей всех узловых точек системы. Эта форма уравнений является приемлемой в общем случае.

При автоматическом регулировании напряжения и **первичном автоматическом регулировании** частоты уравнения баланса активных и реактивных мощностей узла №  $i$  (см. рис. 2) имеют вид:



$$\left. \begin{aligned} P_{гi} &= P_{нi} + P_i \\ Q_{гi} &= Q_{нi} + Q_i \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

где  $i = 1, 2, \dots, m$  — число узловых точек системы;  $P_{гi}$  и  $Q_{гi}$  определяются на основе (2),  $P_{нi}$  и  $Q_{нi}$  на основе (1), а  $P_i$  и  $Q_i$  на основе (12).

Неизвестные параметры режима: одна частота  $f$ ,  $m$  напряжений узловых точек  $U_i$  и  $m-1$  взаимных углов между векторами напряжения  $\delta_{ij}$  определяются полностью  $2m$  уравнениями (18).

Эти уравнения желательно представить иначе.

Обозначим функциями небаланса активных и реактивных мощностей узловой точки №  $i$  от частоты  $f$ , напряжений  $U_1, \dots, U_m$  и взаимных углов  $\delta_{12}, \dots, \delta_{1m}$  функции:

$$\left. \begin{aligned} P_{нбгi} &= P_{нбгi}(f, U_1, \dots, U_m, \delta_{12}, \dots, \delta_{1m}) = \\ &= P_{гi} - P_{нi} - P_i \\ Q_{нбгi} &= Q_{нбгi}(f, U_1, \dots, U_m, \delta_{12}, \dots, \delta_{1m}) = \\ &= Q_{гi} - Q_{нi} - Q_i \end{aligned} \right\}, \quad (19)$$

и тогда параметры режима  $f, U_1, \dots, U_M, \delta_{12}, \dots, \delta_{1M}$  определяются условием, что функции небаланса мощностей всех узловых точек системы равны нулю:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{нбг}i}(f, U_1, \dots, U_M, \delta_{12}, \dots, \delta_{1M}) &= 0 \\ Q_{\text{нбг}i}(f, U_1, \dots, U_M, \delta_{12}, \dots, \delta_{1M}) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

$$i = 1, \dots, M$$

Эти уравнения называются уравнениями небаланса мощностей узловых точек.

При вторичном автоматическом регулировании частоты и при неограничении перетоков мощностей электрических связей единственная разница в общих уравнениях (20) заключается в том, что вместо или даже кроме неизвестной частоты  $f$  появляется новый неизвестный параметр режима в зависимости от метода автоматического регулирования частоты и режима системы (обычно суммарная активная мощность всех регулирующих станций  $P_{\Gamma\Sigma}$ ).

При вторичном автоматическом регулировании частоты и при ограничении перетоков мощностей слабых электрических связей разница в общих уравнениях (20) заключается в том, что вместо или даже кроме неизвестной частоты обычно появляются новыми параметрами режима суммарные активные мощности регулирующих станций тех частей системы, внутри которых имеются относительно жесткие связи и которые разделены слабыми связями. Для определения всех новых параметров режима необходимо составить еще уравнения небалансов активных обменных мощностей всех систем. Они выражают то обстоятельство, что обменная активная мощность какой-либо части системы, определяемая на основе критерия ограничения мощности, минус эта же мощность, определяемая на основе сетевых параметров, равна нулю.

Как пример, рассмотрим случай к объединенных систем, связанных слабыми связями, если для ограничения обменных мощностей используется регулирование частоты каждой системы статически по обменной мощности данной системы и если для распределения активных мощностей между регулируемыми станциями каждой системы используется регулирование по методу виртуального статизма или по комбинированным критериям (см. [4]).

Для узловых точек объединенной системы, где имеются регулирующие станции, уравнения небаланса мощностей имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{нбг}i} (P_{\Gamma\Sigma j}, f, U_1, \dots, U_M, \delta_{12}, \dots, \delta_{1M}) &= 0 \\ Q_{\text{нбг}i} (P_{\Gamma\Sigma j}, f, U_1, \dots, U_M, \delta_{12}, \dots, \delta_{1M}) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (21)$$

где  $i = 1, \dots, m'$  — число регулирующих станций объединенной системы;

$P_{\Gamma\Sigma j}$  — суммарная мощность регулирующих станций системы №  $j$  ( $j = 1, \dots, k$ ).

Для остальных узловых точек эти уравнения сохраняют вид (20):

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{нбг}i} (f, U_1, \dots, U_M, \delta_{12}, \dots, \delta_{1M}) &= 0 \\ Q_{\text{нбг}i} (f, U_1, \dots, U_M, \delta_{12}, \dots, \delta_{1M}) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (22)$$

где  $i = m', \dots, m$ ;  $m$  — суммарное число узловых точек объединенной системы.

Уравнение небаланса обменной активной мощности системы №  $s$  имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{обнб}s} (f, U_1, \dots, U_M, \delta_{12}, \dots, \delta_{1M}) &= P_{\text{об}s} - \sum_{j=1}^v P_j \\ S &= 1, \dots, k \end{aligned} \right\}, \quad (23)$$

где функция обменной активной мощности системы №  $s$ :

$$P_{\text{об}s} = P_{\text{об}s}(f) = P_{\text{об}3s} - \frac{P_{\text{нс}} \rho_p}{f_0} (f - f_0), \quad (24)$$

определяется на основе критерия регулирования системы №  $s$ :

$$\frac{\Delta f}{f_0} + \frac{P_{\text{об}3s} - P_{\text{об}s}}{P_{\text{нс}} \rho_s} = 0; \quad (25)$$

$\sum_{j=1}^v P_j$  — обменная активная мощность системы №  $s$  как сумма активных мощностей слабых связей в точках их измерения, определяемых аналогично (12) в функции от сетевых параметров  $f, U_1, \dots, U_M, \delta_{12}, \dots, \delta_{1M}$ .

$2M + k$  неизвестных параметров режима  $P_{\Gamma\Sigma 1}, \dots, P_{\Gamma\Sigma k}, f, U_1, \dots, U_M, \delta_{21}, \dots, \delta_{1M}$  определяются  $2M + k$  уравнениями (21), (22) и (23).

Если в электрической системе отдельные узловые точки сети переменного тока связаны дополнительными **электрическими связями постоянного тока**, то полностью сохраняется рассмотренная выше форма уравнений, поскольку влияние электрической связи постоянного тока можно учитывать как влияние дополнительных нагрузочных и генерируемых мощностей соответствующих узловых точек при автоматическом регулировании частоты, напряжения и мощности.

В частном случае, когда отдельные системы переменного тока связаны только связями постоянного тока, режим объединенной системы определяется совместно уравнениями отдельных систем переменного тока, в которых влияние связей постоянного тока учитывается дополнительными нагрузками и генераторами.

## ВЫВОДЫ

1. Общие методы расчета стационарных режимов электрических систем с учетом статических характеристик нагрузок и генераторов при автоматическом регулировании частоты, напряжения и мощности еще недостаточно разработаны.

2. Общие методы расчета необходимы для определения областей использования существующих упрощенных методов, для сознательной и систематической разработки новых упрощенных методов в зависимости от цели расчета и режима системы, для статического моделирования стационарных режимов, а также для использования вычислительных машин с целью расчета стационарных режимов электрической системы.

3. Использование функций генерируемых, нагрузочных и сетевых узловых мощностей от параметров режима системы позволяет составить функции и уравнения небалансов узловых мощностей, которые полностью определяют режим системы и его изменения с учетом статических характеристик нагрузок, генераторов и электрических связей постоянного тока при автоматическом регулировании частоты, напряжения и мощности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Х. Ф. Фазылов. Теория и методы расчета электрических систем. Изд. АН УзССР, 1953.
2. И. С. Брук и И. М. Маркович. О статической устойчивости сложных электрических систем. «Электричество» № 9, 1938.
3. Л. А. Крумм. Методы расчета стационарных режимов электрических систем при первичном и вторичном автоматическом регулировании частоты и о влиянии электрических связей на регулирование частоты. Кандидатская диссертация. Томский политехнический институт, 1955.
4. И. М. Маркович. Энергетические системы и их режимы. ГЭИ, 1952.
5. Н. Graner. Das Richt-vektorverfahren zur Leistungs-Frequenz- und Uhrzeitregelung in grossen Netzen. «ETZ» № 13, S. 341—4, 1950.
6. О. Терно. К вопросу о регулировании частоты в объединенных энергосистемах. «Труды Таллинского Политехнического института», № 79, 1957.
7. П. П. Острый. Автоматическое регулирование частоты и активной мощности импульсными регуляторами. ГЭИ, 1955.
8. С. Р. Буачидзе. Регулирование активной и реактивной мощностей межсистемного звена постоянного тока. «Труды Таллинского Политехнического Института», № 87, 1957.

## SUMMARY

This paper describes the composition of universal equations of the stationary regime of electrical system while taking into account the stationary characteristics of load, generating units and d. c. lines as well as automatically regulated frequency, tension and power.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение . . . . .	3
<b>А. УРАВНЕНИЯ ОТДЕЛНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ</b>	
1. Уравнения нагрузочных и генерируемых мощностей . . . . .	6
2. Уравнения электрической сети . . . . .	10
<b>В. УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ</b>	
1. Первая форма уравнений . . . . .	13
2. Вторая форма уравнений . . . . .	15
Выводы . . . . .	18
Литература . . . . .	19
Резюме на английском языке . . . . .	19

Л. А. Крумм

УРАВНЕНИЯ СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗОК И ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ, НАПРЯЖЕНИЯ И МОЩНОСТИ

\*

Издательство  
Таллинского Политехнического Института

Редактор Б. Тамм

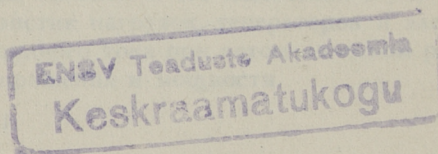
Технический редактор А. Тамм

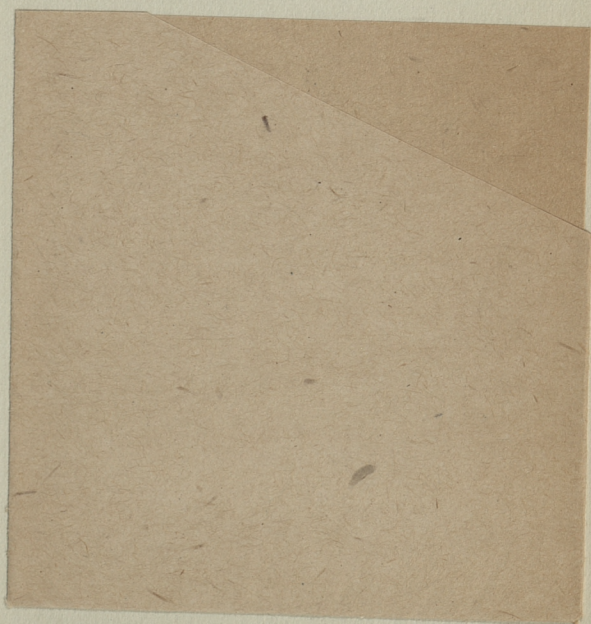
Корректор О. Терно

Подписано к печати 4 XI 1957. Бумага 54×84<sup>1/16</sup>. Печатных листов 1,5. По формату 60×92 печатных листов 1,03. Учетно-издательских листов 0,88. Тираж 800. Заказ № 728. МВ-07085.

Типография Управления Делами СМ ЭССР, Таллин.

Цена 65 коп.





Цена 65 коп.