

**Л. А. Крумм**

**Использование, трудоемкость и автоматизация  
вычислительного процесса методов расчета  
стационарных режимов электрических систем 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

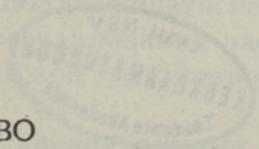
№ 126

1957

Л. А. Крумм

**Использование, трудоемкость и автоматизация  
вычислительного процесса методов расчета  
стационарных режимов электрических систем с учетом  
статических характеристик нагрузок и генераторов  
при автоматическом регулировании частоты,  
напряжения и мощности**

1957



ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
ТАЛЛИН, 1957

Ep. 2295

ТАЛЛИНА ПОЛТЕХНИЧЕСКОЕ ИНСТИТУТДИ ТÕIMEPIIBE  
TALLINN POLYTECHNIC INSTITUTE

1977

№ 159

Л. А. Косов

ВВЕДЕНИЕ  
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ  
2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ  
3. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ  
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
5. ВЫВОДЫ

Ep. 2295



ТАЛЛИНА ПОЛТЕХНИЧЕСКОЕ ИНСТИТУТДИ ТÕIMEPIIBE  
TALLINN POLYTECHNIC INSTITUTE

## ВВЕДЕНИЕ

В статьях [1; 2; 3] изложены методы расчета стационарных режимов электрических систем с учетом статических характеристик нагрузок и генераторов при автоматическом регулировании частоты, напряжения и мощности.

Эти общие методы можно использовать для определения областей использования существующих упрощенных методов, а также для систематической разработки новых упрощенных методов в зависимости от цели расчета и режима системы.

В настоящей статье рассматриваются более систематизированные области использования общих методов расчета. Особое внимание обращается на вопросы трудоемкости и автоматизации вычислительного процесса. Показываются основные пути упрощения общей методики для разработки упрощенных методов.

### А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБЩИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА

#### 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА СИСТЕМЫ ПРИ ЗАДАННЫХ УРАВНЕНИЯХ

Это необходимо с точки зрения **режима всей системы** для определения:

во-первых, качества электрической энергии, т. е. отклонений частоты и напряжений узловых точек от их номинальных значений, с целью поддерживать отклонения частоты и напряжений в допустимых пределах;

во-вторых, резерва активной и реактивной мощностей и пропускной способности с целью поддерживать необходимые резервы для автоматического регулирования частоты и напряжения и обеспечения статической устойчивости режима.

Это необходимо также с точки зрения **режима отдельных элементов системы** (генераторов, трансформаторов, линий электропередачи и нагрузок) для определения их на-

грузки с целью предотвратить перегрузку. Этот же вопрос тесно связан с вопросами обеспечения резервов.

Для определения стационарного режима можно использовать метод последовательных приближений Ньютона-Рафсона [2], если удастся выбрать вектор параметров режима исходного приближения  $X_0$  достаточно близко к вектору параметров исследуемого режима  $X_n$ . В противном случае менее трудоемким оказывается использование усовершенствованного метода последовательных интервалов [2; 3].

**Существующие упрощенные методы** расчета стационарных режимов являются в основном методами определения стационарного режима при заданных уравнениях. На основе общей методики можно определить их точность и область использования, в частности, с учетом статических характеристик нагрузок и генераторов.

На основе общей методики можно разработать **новые упрощенные методы**, в частности, методы определения нормальных режимов в случае любого числа регулирующих станций и методы определения послеаварийных режимов. Послеаварийные режимы связаны обычно частным или общим недостатком резерва активной и реактивной мощности и пропускной способности и, следовательно, значительными изменениями частоты и напряжения. Здесь могут представлять интерес упрощенные методы определения частоты и напряжения с учетом статических характеристик нагрузок, генераторов и электрических связей.

## II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА ПРИ ВОЗМУЩЕНИЯХ СИММЕТРИЧНОГО ХАРАКТЕРА

Это необходимо в основном с двух точек зрения:

### а. **Определение стационарного режима, установившегося после возмущения**

Цель расчета такая же, как в пункте I, только определение установившегося после возмущения режима на основе изменения его при данном возмущении проще, чем непосредственное определение режима системы при заданных ее уравнениях.

В общем случае определение изменения режима при данных возмущениях осуществляется усовершенствованным методом последовательных интервалов весьма просто.

Как уже было отмечено в [2], при возмущениях в большинстве случаев можно ограничиваться только одним первым интервалом. Если в этом случае вычислена обратная матрица  $A^{-1}$  на основе только уравнений исходного до возмущения режима, то при любых возмущениях изменение вектора параметров режима определяется простой формулой (см. [3] ф. (15), (14) и (38), (39)):

$$dX = A^{-1} \frac{dF_0}{d\lambda} \Delta\lambda, \quad (1)$$

где только  $\frac{dF_0}{d\lambda}$  и  $\Delta\lambda$  зависят от возмущающего фактора.

Существующие упрощенные методы определения изменения режима, известные под названием метода суперпозиции, разработаны для случаев, когда возмущения появляются в виде включения отдельных элементов системы. Область использования этих методов может быть установлена на основе общей методики, также как могут быть разработаны новые упрощенные методы при всяких симметричных возмущениях, в частности, в случае возмущений, вызывающих изменение функций эквивалентных генерируемых мощностей.

#### **в. Определение скорости изменения стационарного режима при изменении любых возмущающих факторов**

Скорость изменения режима всей системы и ее отдельных элементов полностью определяется производной вектора параметров режима  $\frac{dX}{d\lambda}$ . При этом усовершенствованный метод последовательных интервалов позволяет следить за изменением  $\frac{dX}{d\lambda}$  в зависимости от изменения исходного до возмущения режима.

С этой точки зрения цели расчета можно разделить на три группы.

1. Определение допустимого изменения фактора возмущения для того, чтобы качество электрической энергии, резервы активной и реактивной мощностей и пропускной способности электрических связей и нагрузки отдельных элементов системы не вышли за допустимые пределы

На основе усовершенствованного метода можно найти зависимость отклонений частоты и напряжений, резервов и нагрузок отдельных элементов от возмущающего фактора  $\lambda$ .

Следовательно, можно определить и допустимые изменения  $\lambda$ .

Сюда необходимо отнести вычисление критериев, характеризующих качество регулирования частоты и напряжения и взаимосвязь регулирования частоты и напряжения. Эти критерии позволяют максимально использовать резервы активной и реактивной мощностей для регулирования частоты и напряжения. Также относится сюда вычисление некоторых критериев для правильной настройки регуляторов частоты и напряжения и автоматов аварийной разгрузки.

Несомненно могут быть здесь разработаны и соответствующие упрощенные методы.

## 2. Расчет статической устойчивости на основе метода малых возмущений

При возможности самораскачивания, особенно в случае автоматических регуляторов т. н. «сильного действия», позволяющих работу во всей зоне искусственной устойчивости, необходимо вести расчет на основе метода **малых колебаний** [4; 5; 6]. На основе этой методики можно определить оптимальные параметры регуляторов, при которых предотвращено самораскачивание во всех практически встречаемых случаях.

Использование метода малых колебаний для анализа статической устойчивости режима сложной системы, — в частности, для определения запаса статической устойчивости в зависимости от изменения режима с учетом автоматического регулирования частоты и напряжения, — становится чрезвычайно сложным.

Как показали исследования И. М. Марковича и С. А. Савалова [4, 7], в случае, когда в системе предотвращена возможность самораскачивания, расчет статической устойчивости можно вести гораздо проще даже с учетом метода малых колебаний на основе **метода малых возмущений** или, — что то же самое, — **малых отклонений**.

По этой методике в общем случае статическая устойчивость проверяется последовательно на основе т. н. практических критериев статической устойчивости:

$$\frac{dP_1}{d\delta_1}, \dots, \frac{dP_i}{d\delta_i}, \dots, \frac{dQ_{n1}}{dU_1}, \dots, \frac{dQ_{ni}}{dU_i}, \dots, \frac{dP_{ni}}{df}, \quad (2)$$

предоставляя последовательно свободу изменения закрепленным т. н. сомнительным параметрам режима:  $\delta_i$  — угол между векторами ЭДС в начале связи и вектором напряжения в конце радиальной электрической связи №  $i$ ;  $U_i$  — напряжение узла №  $i$ ;  $f$  — частота. В (2)  $dP_i$  — изменение активной мощности электрической связи при изменении  $\delta_i$  на  $d\delta_i$ ;  $dQ_{ni}$  — малая возмущающая реактивная мощность нагрузки узла №  $i$  с точки зрения метода малых возмущений или небаланс реактивной мощности узла №  $i$  с точки зрения метода малых отклонений;  $dP_{ni}$  — аналогично, — малая возмущающая активная мощность нагрузки узла №  $i$  или небаланс активной мощности узла №  $i$ .

Методы определения практических критериев  $\frac{dQ_{ni}}{dU_i}$  и  $\frac{dP_{ni}}{df}$  в достаточно общем виде не разработаны.

На основе усовершенствованного метода последовательных интервалов можно определить критерии  $\frac{dQ_{ni}}{dU}$  и  $\frac{dP_{ni}}{df}$  достаточно просто в весьма общем виде.

Критерий  $\frac{dQ_{ni}}{dU_i}$  определяется производной вектора параметров режима  $\frac{dX}{d\lambda}$ , если выбрать в качестве возмущающего фактора  $\lambda$  суммарную реактивную генерируемую мощность бесконечно малых фиктивных генераторов узла №  $i$   $q'_{ri}$  при  $p'_{ri} = 0$  (см. [3]). При этом производная

$$\left. \begin{aligned} & \frac{dX}{d\lambda} = \frac{dX}{dQ_{ri}} = \\ & = \left( \frac{df}{dQ_{ri}}, \frac{dU_1}{dQ_{ri}}, \dots, \frac{dU_i}{dQ_{ri}}, \dots, \frac{dU_M}{dQ_{ri}}, \frac{d\delta_{12}}{dQ_{ri}}, \dots, \frac{d\delta_{1M}}{dQ_{ri}} \right) \end{aligned} \right\} (3)$$

определяется уравнением (см. [3] ф (41)):

$$A_0 \frac{dX}{dQ_{ri}} = \frac{dF_0}{dQ_{ri}}, \quad (4)$$

где производная вектора возмущения имеет вид:

$$\frac{dF_0}{dQ_{ri}} = - (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0). \quad (5)$$

Далее

$$\frac{dQ_{ni}}{dU_i} = - \frac{1}{\frac{dU_i}{dQ_{ri}}} \quad (6)$$

Аналогично, критерий

$$\frac{dP_{ni}}{df} = - \frac{1}{\frac{df}{dP_{ri}}} \quad (7)$$

где  $\frac{df}{dP_{ri}}$  является компонентом вектора  $\frac{dX}{dP_{ri}}$ , который определяется аналогично, выбирая возмущающим фактором  $p'_{ri}$  при  $q'_{ri} = 0$ .

Одновременно производная вектора параметров режима по любому возмущающему фактору  $\frac{dX}{d\lambda}$  является сама весьма общим практическим критерием статической устойчивости с точки зрения метода малых возмущений, из которого вытекают только что рассмотренные практические критерии как частные случаи в смысле характера возмущения и параметров режима, изменение которых рассматривается при данном возмущении.

Действительно, — как известно из [4], — режим системы является статически устойчивым, если изменения параметров режима при данном виде возмущения можно сделать сколько угодно малым, при условии, что возмущение взято достаточно малым.

Это обстоятельство и выражается в общем виде конечным значением производной  $\frac{dX}{d\lambda}$ .

Режим системы приближается к пределу статической устойчивости, если  $\frac{dX}{d\lambda} \rightarrow \infty$ , так как на пределе статической устойчивости не удастся сделать  $dX$  сколько угодно малым, если возмущение  $d\lambda$  сделать даже сколько угодно малым.

Критерий  $\frac{dX}{d\lambda}$  имеет перед выше рассмотренными критериями следующие преимущества:

Во-первых,  $\frac{dX}{d\lambda}$  определяет скорость изменения одновременно всех параметров режима, что позволяет легче выяснить самые «слабые» с точки зрения статической устойчивости параметры режима или т. н. сомнительные параметры режима.

Во-вторых,  $\frac{dX}{d\lambda}$  позволяет учитывать влияние возмущений любого характера. Для проверки только факта о наличии статической устойчивости режима можно выбрать любой характер возмущений. Но для определения запаса статической устойчивости важное значение имеет вопрос — насколько быстро режим системы приближается к пределу статической устойчивости при изменении возмущающего фактора любого практически возможного характера. Очевидно, что чем больше  $\frac{dX}{d\lambda}$ , тем меньше запас статической устойчивости по изменению  $\lambda$  при равных прочих условиях.

Расчет статической устойчивости на основе критерия  $\frac{dX}{d\lambda}$  осуществляется усовершенствованным методом последовательных интервалов.

Для проверки статической устойчивости испытываемого режима на основе критерия  $\frac{dX}{d\lambda}$  необходимо исследовать статическую устойчивость, начиная с заведомо устойчивого режима при ухудшении его вплоть до испытываемого режима [4].

Переход от заведомо устойчивого режима до испытываемого режима осуществляется усовершенствованным методом последовательных интервалов весьма удобно. Если в ходе этого  $\frac{dX}{d\lambda}$  сохраняет конечное значение, то испытываемый режим устойчив. Если же  $\frac{dX}{d\lambda}$  увеличивается, приближаясь вначале к бесконечности (в результате приближения одного или несколько компонентов вектора  $\frac{dX}{d\lambda}$  к бесконечности), а потом уменьшается и получит конечное значение (при этом компоненты, значения которых прохо-

дят через бесконечность, меняют одновременно и свой знак), то испытуемый режим неустойчив. При таком переходе режима необходимо изменить возмущающие факторы таким образом, как это приблизительно происходит в действительности.

Совершенно аналогично можно на основе усовершенствованного метода последовательных интервалов определить **запас статической устойчивости испытуемого режима** по изменению возмущающих факторов любого характера. Запас статической устойчивости в этом случае измеряется изменением возмущающих факторов от испытуемого режима вплоть до предела статической устойчивости, когда  $\frac{dX}{d\lambda} \rightarrow \infty$ .

Обычно запас статической устойчивости измеряется изменением параметров режима  $\Delta\delta$ ,  $\Delta U$  и  $\Delta f$  от испытуемого режима вплоть до предела статической устойчивости.

При одном и том же запасе статической устойчивости, выраженном в изменении параметров режима, запас статической устойчивости, выраженный в изменении возмущающих факторов, может быть в зависимости от режима системы и характера возмущения совершенно разным. Поэтому было бы желательно — во всяком случае в некоторых случаях — запас статической устойчивости выразить в изменениях возмущающих факторов, так как эти изменения являются непосредственной причиной перехода режима системы к пределу статической устойчивости.

В ходе вычислительного процесса на основе усовершенствованного метода последовательных интервалов могут возникнуть большие затруднения с вычислением изменений вектора параметров режима, если  $\frac{dX}{d\lambda} \rightarrow \infty$ . В этом слу-

чае можно вместо критерия  $\frac{dX}{d\lambda}$  критерием статической устойчивости использовать определитель  $|A|$  матрицы  $A$ , который при приближении к пределу статической устойчивости приближается к нулю  $|A| \rightarrow 0$ .

Действительно, из выражения:

$$\frac{dX}{d\lambda} = A^{-1} \frac{dF}{d\lambda} = \frac{C \frac{dF}{d\lambda}}{|A|}, \quad (8)$$

где  $C$  — союзная матрица матрицы  $A$ , следует, что  $\frac{dX}{d\lambda}$  приближается к бесконечности только благодаря тому, что  $|A| \rightarrow 0$ , так как элементы  $C$  и  $\frac{dF}{d\lambda}$  при любом возмущении имеют конечные значения.

В пределах последнего интервала до предела статической устойчивости  $|A|$  можно выразить функцией вектора  $X$ . В своей очереди в этих же пределах  $X$  является линейной функцией  $\lambda$ . Следовательно, значение  $\lambda$  на пределе статической устойчивости можно определить из условия:

$$|A| = F(\lambda) = 0. \quad (9)$$

Приближение  $\frac{dX}{d\lambda}$  к бесконечности, однако, не обязательно означает, что на пределе, когда  $|A| = 0$ ,  $\frac{dX}{d\lambda} = \infty$ ;  $\frac{dX}{d\lambda}$  остается совершенно неопределенным или имеет бесконечно много значений [8].

Очевидно, теоретически более точные результаты можно получить на основе критериев (2), если осуществить соответствующее последовательное освобождение закрепленных параметров режима, чем и учитывается влияние требований метода малых колебаний при отсутствии возможности самораскачивания. При этом еще не ясно, в каких случаях неучет закрепления параметров режима обуславливает ошибку в определении предела статической устойчивости, и если обуславливает, то в какой мере.

**Ошибка** появляется, очевидно, тогда, когда при полной свободе всех параметров режима режим системы оказывается устойчивым, а при частичном закреплении параметров режима — неустойчивым, так как без учета требований метода малых колебаний режим системы является устойчивым, а с учетом этого — неустойчивым.

Но такие случаи, вероятно, не часто встречаются, так как закрепление сомнительных параметров режима обычно улучшает статическую устойчивость режима. И если такие случаи встречаются, то ошибка наверно незначительная.

### 3. Определение экономического режима электрической системы

Теоретические основы расчета экономического распределения активных и реактивных генерируемых мощностей узловых точек разработаны в достаточно общем виде [4]. Тем не менее практически осуществить эти расчеты в достаточно общем виде не удастся, поскольку отсутствуют методы расчета, позволяющие определить частные производные активных и реактивных мощностей нагрузок по генерируемым

мощностям узловых точек:  $\frac{\partial P_{гi}}{\partial P_{гi}}, \frac{\partial P_{гi}}{\partial Q_{гi}}, \frac{\partial Q_{гi}}{\partial P_{гi}}, \frac{\partial Q_{гi}}{\partial Q_{гi}}$ . Весьма

большими упрощениями определяются частные производные активной и реактивной мощностей потерь электрической сети по генерируемым мощностям:

$$\frac{\partial \pi}{\partial P_{гi}}, \frac{\partial \pi}{\partial Q_{гi}}, \frac{\partial q}{\partial P_{гi}}, \frac{\partial q}{\partial Q_{гi}}$$

Использование усовершенствованного метода последовательных интервалов позволит преодолеть эти трудности.

Узловая точка (предположим № 1), к которой присоединена регулирующая частоту станция, является действительной балансирующей точкой для активных мощностей. При этом активная генерируемая мощность узла № 1  $P_{г1}$  является новым параметром режима вместо частоты.

Экономичное распределение генерируемых активных мощностей  $P_{гi}$  остальных узловых точек  $i = 2, \dots, M$  предполагает фиксацию этих мощностей автоматическими регуляторами активной мощности.

Аналогично экономическое распределение генерируемых реактивных мощностей  $Q_{гi}$  предполагает фиксацию этих мощностей автоматическими регуляторами реактивной мощности. Балансирующей точкой для реактивной мощности можно также выбрать точку № 1. Если в узле № 1 имеется совершенный автоматический регулятор напряжения, который фиксирует напряжение  $U_1$ , то балансирующая реактивная генерируемая мощность узла № 1  $Q_{г1}$  станет новым параметром режима вместо  $U_1$ .

Фиксированные генерируемые мощности  $P_{гi}$  и  $Q_{гi}$  можно рассмотреть как параметры автоматических регуляторов мощности. Изменение этих параметров вызывает изменение стационарного режима. Следовательно, генериру-

емые мощности станций, регулирующих мощность,  $P_{Гi}$  и  $Q_{Гi}$  можно рассмотреть также как возмущающие факторы  $\lambda$ .

Отсюда следует, что можно вычислить производную вектора параметров режима

$$\frac{dX}{d\lambda} = \left( \frac{dP_{Г1}}{d\lambda}, \frac{dQ_{Г1}}{d\lambda}, \frac{dU_2}{d\lambda}, \dots, \frac{dU_M}{d\lambda}, \frac{d\delta_{12}}{d\lambda}, \dots, \frac{d\delta_{1M}}{d\lambda} \right) \quad (10)$$

по любой генерируемой мощности

$$\lambda = P_{Г2}, Q_{Г2}, \dots, P_{ГM}, Q_{ГM}. \quad (11)$$

Далее можно вычислить производные суммарных активной и реактивной мощностей нагрузок по любой генерируемой мощности  $\lambda$ :

$$\frac{dP_{H\Sigma}}{d\lambda} = \sum_{i=1}^M \frac{\partial P_{Hi}}{\partial U_i} \frac{dU_i}{d\lambda}; \quad \frac{dQ_{H\Sigma}}{d\lambda} = \sum_{i=1}^M \frac{\partial Q_{Hi}}{\partial U_i} \frac{dU_i}{d\lambda}. \quad (12)$$

Потери активной мощности  $\pi$  равны сумме всех сетевых узловых активных мощностей:

$$\pi = \sum_{i=1}^M P_i. \quad (13)$$

Аналогично и потери реактивной мощности:

$$q = \sum_{i=1}^M Q_i. \quad (14)$$

Частная производная потерь активной мощности по любой генерируемой мощности  $\lambda$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \pi}{\partial \lambda} &= \sum_{i=1}^M \frac{\partial P_i}{\partial \lambda} = \\ &= \left( \sum_{i=1}^M \frac{\partial P_i}{\partial U_2} \right) \frac{dU_2}{d\lambda} + \dots + \left( \sum_{i=1}^M \frac{\partial P_i}{\partial U_M} \right) \frac{dU_M}{d\lambda} + \\ &+ \left( \sum_{i=1}^M \frac{\partial P_i}{\partial \delta_{12}} \right) \frac{d\delta_{12}}{d\lambda} + \dots + \left( \sum_{i=1}^M \frac{\partial P_i}{\partial \delta_{1M}} \right) \frac{d\delta_{1M}}{d\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Аналогично определяется частная производная потерь реактивной мощности электрической сети.

Определение минимума функции часового расхода условного топлива всех станций

$$T = \sum_{i=1}^M T_i (P_{ri}) = T (P_{r2}, Q_{r2}, \dots, P_{rM}, Q_{rM}) \quad (16)$$

в общем случае значительно упрощается, если вычислить на основе усовершенствованного метода последовательных интервалов непосредственно частные производные функции (16) по любой генерируемой мощности (11).

При этом необходимо учесть, что генерируемая активная мощность регулирующей частоту станции  $P_{r1}$  как параметр режима зависит от всех возмущающих факторов  $\lambda$  (11).

**Экономичное распределение активных генерируемых мощностей** определяется условием равенства нулю всех частных производных функции (16) по генерируемым активным мощностям:

$$\frac{\partial T}{\partial P_{ri}} = \frac{\partial T_i}{\partial P_{ri}} + \frac{\partial T_1}{\partial P_{r1}} \frac{dP_{r1}}{dP_{ri}} = \varepsilon_i + \varepsilon_1 \frac{dP_{r1}}{dP_{ri}} = 0, \quad (17)$$

где  $i = 2, 3, \dots, M$ ;

$\varepsilon_i$  и  $\varepsilon_1$  — удельные приросты часового расхода условного топлива соответственно станции №  $i$  и регулирующей частоту станции № 1;

$\frac{dP_{r1}}{dP_{ri}}$  — производная активной генерируемой мощности, регулирующей частоту станции по генерируемой активной мощности узла №  $i$ .

Из (17) получается весьма простое выражение для определения экономичной генерируемой активной мощности любого узла №  $i$ :

$$\varepsilon_i = \varepsilon_1 \left| \frac{dP_{r1}}{dP_{ri}} \right|. \quad (18)$$

Всегда  $\frac{dP_{r1}}{dP_{ri}} < 0$ . Абсолютное значение  $\left| \frac{dP_{r1}}{dP_{ri}} \right|$  явля-

ется больше или меньше единицы в зависимости от направления мощностей в сложной сети между узлами №  $i$  и № 1.

Вычисление в общем виде производной  $\frac{dP_{r1}}{dP_{ri}}$  весьма

простое, поскольку  $\frac{dP_{r1}}{dP_{ri}}$  является первым компонентом вектора (10), когда  $\lambda = P_{ri}$ .

На основе (18) можно автоматизировать экономичное распределение активных генерируемых мощностей.

**Экономичное распределение реактивных генерируемых мощностей** определяется условием равенства нулю всех частных производных функции (16) по генерируемым реактивным мощностям:

$$\frac{\partial T}{\partial Q_{ri}} = \frac{\partial T}{\partial P_{ri}} \frac{dP_{ri}}{dQ_{ri}} = \varepsilon_1 \frac{dP_{ri}}{dQ_{ri}} = 0, \quad (19)$$

где  $i = 2, \dots, M$ .

Поскольку  $\varepsilon_1 \neq 0$ , то условия (19) равносильны условиям:

$$\frac{dP_{ri}}{dQ_{ri}} = 0, \quad (20)$$

где  $i = 2, \dots, M$ .

Вычисление  $\frac{dP_{ri}}{dQ_{ri}}$  весьма простое, поскольку  $\frac{dP_{ri}}{dQ_{ri}}$  является первым компонентом вектора (10), если  $\lambda = Q_{ri}$ .

**Совместное экономичное распределение активных и реактивных генерируемых мощностей** осуществляется совместным решением системы уравнений (17) и (20) относительно генерируемых мощностей (11) на основе метода Ньютона-Рафсона. Это ведет к вычислению производных функций  $\frac{dP_{ri}}{dP_{ri}}$  и  $\frac{dP_{ri}}{dQ_{ri}}$  по любому возмущающему фактору  $\lambda$  (11):  $\frac{d}{d\lambda} \left( \frac{dP_{ri}}{dP_{ri}} \right)$  и  $\frac{d}{d\lambda} \left( \frac{dP_{ri}}{dQ_{ri}} \right)$ , что осуществимо весьма просто на основе усовершенствованного метода последовательных интервалов. Для этого необходимо определить изменения  $d \left( \frac{dP_{ri}}{\partial P_{ri}} \right)$  и  $d \left( \frac{dP_{ri}}{dQ_{ri}} \right)$  при изменении возмущающего фактора  $\lambda$  на  $d\lambda$ .

Экономичное распределение реактивных генерируемых мощностей определяет одновременно экономичные напряже-

ния узловых точек. Однако, при этом напряжения узлов могут выходить за допустимые пределы с точки зрения регулирования напряжения.

Если все станции снабжаются совершенными автоматическими регуляторами напряжения, то напряжения таких узлов можно считать фиксированными. При этом генерируемые реактивные мощности становятся новыми параметрами режима вместо напряжений соответствующих узлов.

В таком случае возникает вопрос об определении экономических напряжений узлов вместо экономических генерируемых мощностей.

**Экономические напряжения узлов** с совершенными автоматическими регуляторами напряжения определяются условием равенства нулю всех частных производных функции (16) по соответствующим напряжениям, которые можно рассмотреть как возмущающие факторы:

$$\frac{\partial T}{\partial U_i} = \frac{\partial T_1}{\partial P_{r1}} \frac{dP_{r1}}{dU_i} = 0. \quad (21)$$

Из (21) вытекают уравнения для определения экономических фиксированных напряжений:

$$\frac{dP_{r1}}{dU_i} = 0, \quad (22)$$

где  $i$  — номер узла с фиксированным напряжением.

$\frac{dP_{r1}}{dU_i}$  определяется как первый компонент производной вектора параметров режима  $\frac{dX}{d\lambda}$ , если  $\lambda = U_i$ .

**Совместное экономичное распределение активных генерируемых мощностей и определение экономических напряжений** решается совместным решением уравнений (17) и (22) на основе усовершенствованного метода последовательных интервалов.

Аналогично, **экономические параметры автоматически регулируемых трансформаторов**  $\lambda$ , в частности в независимых замкнутых контурах, определяются из уравнений:

$$\frac{dP_{r1}}{d\lambda_i} = 0, \quad (23)$$

где  $\lambda_i$  — параметр регулируемого трансформатора №  $i$ .

Совместное экономичное определение генерируемых активных мощностей, генерируемых реактивных мощностей или фиксированных напряжений узлов и параметров регулируемых трансформаторов решается совместным решением соответствующих уравнений (17), (20), (22) и (23) на основе усовершенствованного метода последовательных интервалов.

В общем случае, когда в системе недостаточные резервы активной и реактивной мощностей, могут изменяться как частота, так и напряжения всех узлов. При этом необходимо учесть зависимость всех генерируемых мощностей от частоты и напряжения.

Для того, чтобы учитывать зависимость генерируемых мощностей от параметров режима, необходимо определить экономичный режим не как минимум функции часового расхода удельного топлива  $T$  от фиксированных автоматическими регуляторами генерируемых мощностей и напряжений, а как минимум этой функции от тех параметров автоматических регуляторов частоты и напряжения, которые определяют в основном значения генерируемых мощностей.

Таковыми параметрами могут быть в случае генерируемых мощностей узла №  $i$ :  $P_{gi}$  и  $Q_{gi}$ , параметр  $\lambda_{1i}$ , определяющий в основном значение  $P_{gi}$ , и параметр  $\lambda_{2i}$ , определяющий в основном значение  $Q_{gi}$ , — например, параметры, характеризующие соответственно параллельное смещение характеристик активной и реактивной генерируемых мощностей.

При этом генерируемые мощности являются функциями, — кроме параметров режима, — еще параметров регуляторов  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , которые можно рассмотреть как факторы возмущения. Например, при первичном автоматическом регулировании частоты

$$P_{gi} = P_{gi}(f, U_i, \lambda_{1i}, \lambda_{2i}), \quad Q_{gi} = Q_{gi}(f, U_i, \lambda_{1i}, \lambda_{2i}). \quad (24)$$

Следовательно определение минимума часового расхода удельного топлива требует определить минимум функции

$$\begin{aligned} T &= \sum_{i=1}^M T_i = \sum_{i=1}^M T_i(P_{gi}, Q_{gi}) = \\ &= T(\lambda_{11}, \dots, \lambda_{1M}, \lambda_{21}, \dots, \lambda_{2M}), \end{aligned} \quad (25)$$

где параметры режима зависят от возмущающих факторов, т. е.

$$\begin{aligned} X &= (f, U_1, \dots, U_M, \delta_{12}, \dots, \delta_{1M}) = \\ &= F(\lambda_{11}, \dots, \lambda_{1M}, \lambda_{21}, \dots, \lambda_{2M}). \end{aligned} \quad (26)$$

Вычисление частных производных функции (25) осуществимо усовершенствованным методом последовательных интервалов.

**Рассмотренные возможности использования общей методики могут быть предметом отдельных работ.** В частности, могут быть приведены упрощенные методы определения режима системы в случае нескольких регулирующих станций, упрощенные методы расчета послеаварийных режимов и методы расчета статической устойчивости и определения экономичного режима системы.

## Б. ТРУДОЕМКОСТЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

### 1. ТРУДОЕМКОСТЬ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Как было показано в [2; 3], основное преимущество использования усовершенствованного метода последовательных интервалов вместе с последующим уточнением результата на основе метода последовательных приближений Ньютона-Рафсона заключается в малом суммарном числе последовательных интервалов и приближений (часто только один интервал или одно приближение).

При этом основная трудоемкость вычислительной работы определяется трудоемкостью решения векторно-матричных уравнений типа:

$$AdX = F; \quad A \frac{dX}{d\lambda} = \frac{dF}{d\lambda}, \quad (27)$$

и трудоемкостью определения функций мощностей и их частных производных по параметрам режима или по возмущающим факторам при параметрах режима и возмущающих факторах в начале данного интервала или приближения.

**Аналитические методы решения векторно-матричных уравнений** сравнительно хорошо разработаны [9; 10]. За-

дацией исследования может быть только выбор рациональной методики с точки зрения трудоемкости в зависимости от режима системы и цели расчета, поскольку трудоемкость расчета по тем или иным методам зависит от соотношений элементов матрицы  $A$  и векторов  $F$  и  $\frac{dF}{d\lambda}$ .

Здесь можно только отметить, что менее трудоемким является обычно использование **компактной схемы** для решения векторно-матричных уравнений. Если число узловых точек системы  $M$ , то обычно требуемое число действий умножения и деления для решения векторно-матричного уравнения:

$$S_1 := \frac{2}{3} M(4M^3 + 2M - 1) \approx \frac{8}{3} M^3 \approx 2,66 M^3. \quad (28)$$

**Методы простой и ускоренной итерации** являются обычно более трудоемкими, поскольку при общем виде матрицы  $A$  не удастся обеспечить достаточно быстрой сходимости итеративного процесса. Методы предварительного преобразования уравнения для ускорения сходимости в целом обычно не снижают трудоемкости.

Менее трудоемким может оказаться при определенных условиях **вычисление обратной матрицы  $A^{-1}$  матрицы  $A$  в виде обычно быстро сходящего итеративного процесса**, протекающего параллельно с вычислительным процессом на основе метода последовательных интервалов.

При малом числе  $M$  можно использовать и методы непосредственного обращения матрицы  $A$ .

Значительного снижения трудоемкости решения векторно-матричных уравнений можно добиться автоматизацией вычислительного процесса на **модели решения линейных неоднородных алгебраических уравнений** без ограничительных условий относительно элементов матрицы  $A$ . Число устанавливаемых на модели коэффициентов и измерений:

$$S_2 := 4M(M + 1) \approx 4M^2. \quad (29)$$

При определении стационарного режима или его изменений особой точности модели не требуется, поскольку на модели определяются только небольшие изменения или поправки параметров режима. При этом возникающие ошибки

устраняются самим вычислительным процессом на основе метода последовательных приближений Ньютона-Рафсона.

Вычисление производной  $\frac{dX}{d\lambda}$  с точки зрения скорости изменения режима, например, с точки зрения расчета статической устойчивости и определения экономичного режима системы, требует для решения векторно-матричных уравнений более точной модели.

При особенно большом  $M$  обеспечение необходимой точности для определения стационарного режима и его изменений, а также при большом  $M$  для расчета статической устойчивости и определения экономического режима системы окажется очевидно более экономичным, если использовать вместо модели для решения векторно-матричных уравнений **электронную вычислительную машину**.

Аналитическое определение **сетевых узловых мощностей** и их частных производных по параметрам режима является при большом  $M$  весьма трудоемким.

Определение совместно

$$S_3 = 2M(2M + 1) \approx 4M^2 \quad (30)$$

сетевых узловых мощностей и их частных производных можно полностью автоматизировать использованием **расчетного стола переменного тока** с учетом изменения частоты. Узловые напряжения и взаимные углы между напряжениями моделируются в этом случае ЭДС и их взаимными углами. Частные производные функций сетевых узловых мощностей по данному параметру режима определяются измерением отклонений узловых мощностей при заданном небольшом отклонении данного параметра режима в обе стороны от его значения, при котором определяются все функции мощностей и их частные производные.

Определение совместно в общем виде обычно

$$S_4 = 12M \quad (31)$$

**генерируемых и нагрузочных мощностей** и их частных производных можно вести на основе **типичных графиков** генерируемых и нагрузочных мощностей и их частных производных.

В случае необходимости учесть зависимость генерируемых мощностей от более двух параметров режима и фак-

торов возмущения использование типичных графиков становится слишком трудоемким. При этом генерируемые и нагрузочные мощности и их частные производные можно вычислить проще **аналитически** на основе **упрощенных формул**, которые можно вывести на основе общей методики их вычисления от режима генераторов.

Трудоемкость можно в этом случае снизить еще больше, если автоматизировать определение генерируемых мощностей и их частных производных использованием **универсальной статической модели эквивалентного генератора**.

В случае электрических связей постоянного тока можно было бы аналогично использовать и **модель звена постоянного тока**.

Более высокой степенью автоматизации всего вычислительного процесса является **модель электрической сети, узловым точкам которой подключаются статические модели эквивалентных генераторов и нагрузок**.

Однако возможность использования такой универсальной статической модели электрической системы не исключает значения использования параллельно с этим расчета на основе общей методики (с учетом автоматизации основных узлов вычислительного процесса на вышеотмеченных разных моделях и электронной вычислительной машине), поскольку аналитические методы и моделирование дополняют друг друга.

В частности аналитические методы допускают более сознательное моделирование, упрощение исследуемой схемы системы для моделирования и определения режима в том случае, когда модель может только частично охватывать исследуемую даже упрощенную схему системы. В последнем случае, например, на модели можно определить статические характеристики отдельных частей исследуемой системы (состоящих из сети, станций и нагрузок); далее, на основе общей методики может быть определен режим системы в целом.

В случае автоматизации **экономичного регулирования режима электрической системы** аналитические общие методы расчета являются основой для комбинированного использования моделирующих элементов и электронных вычислительных машин для постоянного вычисления эконо-

мичных параметров автоматических регуляторов мощностей, напряжений и регулируемых трансформаторов.

Аналогично это необходимо для расчетов статической устойчивости.

## II. УПРОЩЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

На основе общей методики можно определить области использования существующих упрощенных методов и разработать упрощенные методы в зависимости от цели расчета и исследуемого режима.

При этом общую методику можно упростить в следующих направлениях:

1. Закрепление параметров режима, которые можно считать практически неизменными при возмущениях, например, частота при вторичном автоматическом регулировании частоты и при достаточном резерве активных мощностей, напряжения узловых точек при автоматическом регулировании напряжения и при достаточном резерве реактивной мощности, активные мощности станций, регулирующих мощность, взаимные углы между векторами напряжения узлов, находящихся электрически далеко от места возмущения. При этом все функции мощностей можно считать независимыми от закрепленных параметров режима.

2. Пренебрежение второстепенными зависимостями функций мощностей от незакрепленных параметров режима, например, активной генерируемой мощности от напряжения, в некоторых случаях реактивной генерируемой мощности от частоты, активной мощности нагрузки от напряжения и частоты и др.

3. Замещение некоторых частей сети вместе со станциями и нагрузками эквивалентными генераторами с учетом статических характеристик отдельных замещаемых элементов.

4. В зависимости от степени упрощения общих уравнений системы можно перейти от общей формы уравнений и от их общей методики решения частично или полностью к другим формам уравнений и методике решения, которые при той же степени упрощения позволяют вести расчет проще, чем на основе общей методики.

# ВЫВОДЫ

I. Общие методы расчета позволяют:

а) на основе методов последовательных приближений и последовательных интервалов определить стационарный режим системы при заданных уравнениях;

б) на основе методов последовательных интервалов проще определить стационарный режим системы вслед за каким-либо возмущением;

в) на основе усовершенствованного метода последовательных интервалов:

1. определить допустимые изменения возмущающих факторов, при которых качество электрической энергии, резервы активной и реактивной мощностей, а также пропускной способности и нагрузки отдельных элементов системы не вышли бы за допустимые пределы;

2. вести расчет статической устойчивости режима системы на основе метода малых возмущений; в частности, определить запас статической устойчивости по изменению параметров режима, а особенно по изменению возмущающих факторов, что является более существенным признаком запаса статической устойчивости;

3. вести определение экономичного режима системы с учетом статических характеристик нагрузок и генераторов при автоматическом регулировании частоты, напряжения и мощности, а также точнее учитывать изменение потерь мощностей электрической сети.

II. Вычислительный процесс может быть в основном автоматизирован использованием модели или электронной вычислительной машины для решения неоднородных алгебраических уравнений, модели электрической сети и иногда статической модели генераторов. Вычислительный процесс может быть полностью автоматизирован использованием модели электрической сети, к которой присоединены статические модели генераторов и нагрузок.

III. Возможность полной автоматизации вычислительного процесса не исключает значения общей методики, которая помогает моделированию и расширяет область его использования. Особенно большое значение будет иметь общая методика для автоматизации регулирования экономичного режима (совместное экономичное определение генерируемых активных мощностей, генерируемых реактивных

мощностей или фиксированных напряжений узлов и параметров регулируемых трансформаторов). Это можно осуществить на основе общей методики комбинированным использованием моделирующих устройств и электронных вычислительных машин.

IV. На основе общей методики можно определить области использования существующих упрощенных методов и разработать новые упрощенные методы в зависимости от цели расчета и режима системы. Это осуществимо сознательным и систематическим упрощением общей методики в направлении закрепления параметров режима, пренебрежения второстепенными зависимостями, преобразования схемы системы в более простой вид и частичного или полного перехода к более простой форме уравнений и методике их решения в зависимости от степени упрощения общей методики.

## SUMMARY

This paper discusses the use, difficulties and the automatization of the calculating process of the universal methods of defining the stationary regime of electrical systems and various stationary regimes by any symmetrical indignations, together with a calculation of the load and generating units static characteristics by the automatic control of frequency, tension and power.

Methods of defining the variations of the stationary regime allow to define simply the stationary regime upon any indignation immediately. They also enable to define the permissible variations of the indignating agents, by which the quality of the electrical energy, the power and capacity reserves and also the loads of system elements do not exceed the permissible limits. Simultaneously they allow to evaluate the static stability of a complex system on the basis of the method of small indignations. This, in particular, enables to ascertain the variation of the regime parameters and especially according to the indignating agents. They also allow to calculate the economical distribution of the power of generating units together with an evaluation of static characteristics of loads and generating powers and an exact determination of variations of the power waste in the network.

The calculating process may be carried out automatically.

On the basis of general methodics a region can be defined, where simplified methods of calculation are applicable, and a more extensive, but still simple method, incidental with the aim of calculations and the system's regime, may be worked out.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. К р у м м. Уравнения стационарного режима электрической системы с учетом статических характеристик нагрузок и генераторов при автоматическом регулировании частоты, напряжения и мощности. «Труды Таллинского политехнического института», № 123, 1957.

2. Л. А. К р у м м. Методы решения общих уравнений стационарного режима электрической системы с учетом статических характеристик нагрузок и генераторов при автоматическом регулировании частоты, напряжения и мощности. «Труды Таллинского политехнического института», № 124, 1957.

3. Л. А. К р у м м. Усовершенствованный метод последовательных интервалов для определения изменения стационарного режима электрической системы при любых возмущениях симметричного характера с учетом статических характеристик нагрузок и генераторов и автоматизации регулирования частоты, напряжения и мощности. «Труды Таллинского политехнического института», № 125, 1957.

4. И. М. М а р к о в и ч. Энергетические системы и их режимы. ГЭИ, 1952.

5. В. П. И н о с о в. Анализ устойчивости энергосистемы по ее энергетическим функциям и вытекающие из него требования к регуляторам, работающим в энергосистемах. «Автоматика и телемеханика». т. 15, № 4, 1954.

6. Л. В. Ц у к е р н и к. Обобщение уравнений динамики сложной энергосистемы и применение электронной счетной машины для анализа устойчивости. «Автоматика и телемеханика», т. 18, № 1, 1957.

7. И. М. М а р к о в и ч и С. А. С о в а л о в. Практические критерии статической устойчивости электрической системы. «Электричество», № 3, 1945.

8. В. И. С м и р н о в. Курс высшей математики, т. 3, ч. 1, Гос. Изд. Техн.-теор. литер., 1953.

9. В. Н. Ф а д е е в а. Вычислительные методы линейной алгебры. Гос. Изд. Техн.-теор. Литер., 1950.

10. Р. Ф р е з е р, В. Д у н к а н и А. К о л л а р. Теория матриц и ее приложения. Изд. Иностран. Литер., 1950.

Введение . . . . .	3
<b>А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБЩИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА</b>	
I. Определение стационарного режима системы при заданных уравнениях . . . . .	3
II. Определение изменений стационарного режима при возмущениях симметричного характера . . . . .	4
а. Определение стационарного режима, установившегося после возмущения . . . . .	4
в. Определение скорости изменения стационарного режима при изменении любых возмущающих факторов . . . . .	5
1. Определение допустимого изменения фактора возмущения . . . . .	5
2. Расчет статической устойчивости на основе метода малых возмущений . . . . .	6
3. Определение экономичного режима электрической системы . . . . .	12
<b>В. ТРУДОЕМКОСТЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА</b>	
I. Трудоемкость и автоматизация вычислительного процесса . . . . .	18
II. Упрощение вычислительного процесса . . . . .	22
Выводы . . . . .	23
Резюме на английском языке . . . . .	25
Литература . . . . .	26

Л. А. Крумм

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ, ТРУДОЕМКОСТЬ И АВТОМАТИЗАЦИЯ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА МЕТОДОВ РАСЧЕТА  
СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
С УЧЕТОМ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗОК  
И ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕГУЛИРОВАНИИ  
ЧАСТОТЫ, НАПРЯЖЕНИЯ И МОЩНОСТИ

\*

Издательство  
Таллинского Политехнического Института

Редактор Б. Тамм

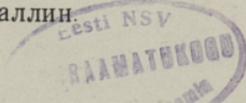
Технический редактор А. Тамм

Корректор О. Терно

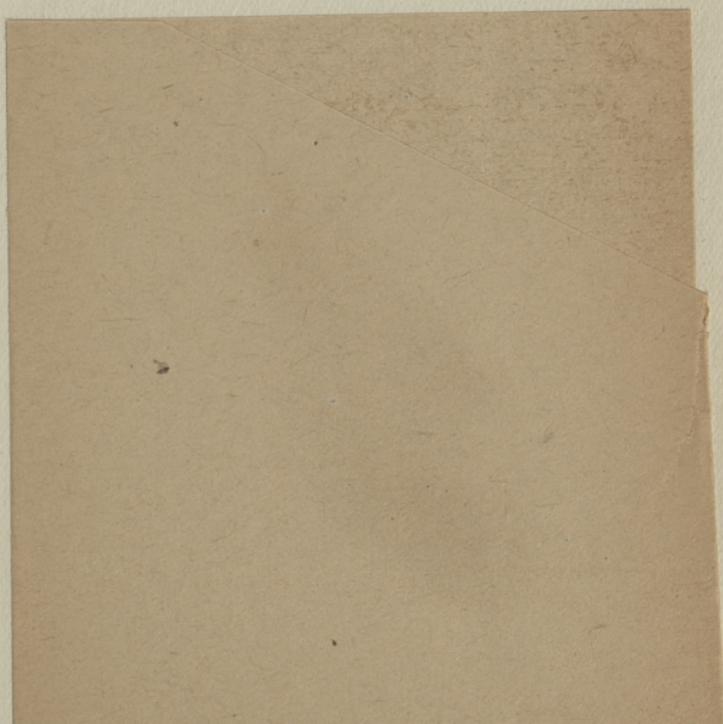
Подписано к печати 8 I 1958. Бумага  $54 \times 84^{1/16}$ . Печатных листов 1,75. По формату  $60 \times 92$  печатных листов 1,43. Учетно-издательских листов 1,27. Тираж 800. Заказ № 855. МВ-00705.

Типография Управления Делами СМ ЭССР, Таллин.

Цена 90 коп.







Цена 90 коп.

EESTI AKADEEMILINE RAAMATUKOGU



1 0200 00089256 6