

Л. А. Крумм

**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**

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ТАЛЛИН, 1957

Er. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА

Серия А

№ 125

1957

Л. А. Крумм

**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**

2022.91

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ТАЛЛИН, 1957

ВВЕДЕНИЕ

Усовершенствованный метод последовательных интервалов является дальнейшим развитием метода последовательных интервалов [1], позволяя упростить определение изменения стационарного режима электрической системы при возмущениях симметричного характера. Кроме того, этот метод имеет совершенно новые возможности использования, например, для расчета статической устойчивости и экономичного распределения активных и реактивных мощностей между генераторами и компенсаторами. Эти возможности будут рассмотрены в отдельной статье.

В случае метода последовательных интервалов изменение вектора параметров режима в каком-либо интервале определяется как результат какого-либо конечного возмущения в виде включения небольших фиктивных генераторов в соответствующие узловые точки.

В случае же усовершенствованного метода последовательных интервалов изменение вектора параметров режима dX рассматривается в пределах любого интервала как непрерывная функция какого-либо возмущающего фактора λ , т. е. параметра, от которого dX зависит почти линейно и изменение которого является по возможности физической причиной возмущения. Вследствие этого можно заменить непосредственное вычисление dX вычислением **производной вектора параметров режима по возмущающему фактору** $\frac{dX}{d\lambda}$ в начале данного интервала, что в ряде случаев проще, чем непосредственное вычисление dX на основе метода последовательных интервалов и расширяет возможности использования.

Далее, изменение вектора параметров режима в данном интервале можно определить на основе элементарной формулы:

$$dX = \frac{dX}{d\lambda} d\lambda, \quad (1)$$

где $d\lambda$ — изменение возмущающего фактора в данном интервале.

В основном этот метод был разработан в Томском политехническом институте под руководством проф. д. т. н. В. К. Щербакова [2]. В Таллинском политехническом институте этот метод получил дальнейшее развитие, особенно в части учета возмущений в виде изменения параметров, включенных на работу элементов электрической системы.

Рассмотрим выбор фактора возмущения и схему вычисления.

А. ВОЗМУЩАЮЩИМ ФАКТОРОМ λ ЯВЛЯЕТСЯ ПАРАМЕТР, ИЗМЕНЕНИЕ КОТОРОГО ВЫЗЫВАЕТ ИЗМЕНЕНИЕ ФУНКЦИЙ МОЩНОСТЕЙ УЖЕ ВКЛЮЧЕННЫХ НА РАБОТУ ГЕНЕРАТОРОВ, НАГРУЗОК И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО ТОКА

Таковыми параметрами являются, например, в случае генерируемых мощностей при первичном автоматическом регулировании частоты: заданная активная мощность при номинальной частоте $P_{г0}$ или коэффициент резерва активной мощности ϕ_p , которые учитывают т. н. параллельное смещение характеристики регулятора скорости, крутизна характеристики активной мощности $\frac{\partial P_{гн*}}{\partial f_*}$, поддерживаемое на входе измерительной схемы

АРН заданное напряжение U_0 при номинальных значениях частоты и напряжения, учитывающее т. н. параллельное смещение характеристики реактивной мощности, крутизна характеристики реактивной мощности $\frac{\partial Q_{гн*}}{\partial U_*}$;

в случае генерируемых мощностей при вторичном автоматическом регулировании частоты, кроме названных параметров АРН, некоторые параметры в критерии регулирования по комбинированным критериям; в случае электрических связей переменного тока емкость компенсирую-

щей установки, параметры трансформаторов продольного и поперечного регулирования; в случае электрических связей постоянного тока параметры регуляторов частоты.

Во всех случаях функции мощностей зависят кроме параметров режима еще от возмущающего фактора λ .

Предположим, что в результате большого возмущения изменение возмущающего фактора:

$$\Delta\lambda = \lambda_{n2} - \lambda_{n1}, \quad (2)$$

где λ_{n1} — значение λ до возмущения,

λ_{n2} — значение λ после возмущения.

Заменим большое возмущение с изменением λ на $\Delta\lambda$ рядом следующими один за другим n небольшими возмущениями с равным изменением λ в каждом интервале на

$$\Delta\lambda_i = \frac{\Delta\lambda}{n}, \quad (3)$$

где i — общий порядковый номер интервала.

Возмущение в виде изменения λ на $\Delta\lambda$ учитывается включением фиктивных генераторов в соответствующие узловые точки с соответствующими функциями мощностей в зависимости от характера возмущения [1].

Общим для функций мощностей фиктивных генераторов, независимо от характера возмущения, является то обстоятельство, что они состоят из двух функций мощностей; одна — это функция до возмущения, определяемая при $\lambda = \lambda_{n1}$, вторая — это функция после возмущения, определяемая при любом значении возмущающего фактора после возмущения λ .

В общем виде функции мощностей фиктивных генераторов можно записать в следующей форме:

1. Если включением фиктивного генератора учитывается изменение функций эквивалентных генерируемых мощностей, (не только генераторов, но и конца электрической связи постоянного тока), то

$$\left. \begin{aligned} P'_{гф} &= P_{г}(X, \lambda) - P_{г}(X, \lambda_{n1}) \\ Q'_{гф} &= Q_{г}(X, \lambda) - Q_{г}(X, \lambda_{n1}) \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

2. Если же включением фиктивного генератора учитывается изменение функций эквивалентных нагрузоч-

ных мощностей (не только нагрузок, но и мощностей, передаваемых из узловых точек в электрическую сеть или электрическую связь переменного тока и мощностей начала электрической связи постоянного тока), то

$$\left. \begin{aligned} P'_{гф} &= P_n(X, \lambda_{п1}) - P_n(X, \lambda) \\ Q'_{гф} &= Q_n(X, \lambda_{п1}) - Q_n(X, \lambda) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В функциях (4) и (5) зависимость от вектора параметров режима X символизирует возможность зависимости этих функций от комбинаций всех возможных параметров режима в зависимости от характера возмущения.

Функции (4) и (5) отличаются формально только индексами и знаками. Поэтому достаточно рассмотреть вывод вычислительной схемы только в первом случае, когда возмущение обуславливает изменение функций эквивалентных генерируемых мощностей.

Определим изменение вектора параметров режима dX , если изменение возмущающего фактора λ вызывает изменение функций эквивалентных генерируемых мощностей разных узловых точек, например узлов k и l .

Функции мощностей фиктивных включаемых генераторов узлов k и l имеют на основе (4) вид:

$$\left. \begin{aligned} P'_{гфк} &= P_{гк}(X, \lambda) - P_{гк}(X, \lambda_{п1}) \\ Q'_{гфк} &= Q_{гк}(X, \lambda) - Q_{гк}(X, \lambda_{п1}) \\ P'_{гфl} &= P_{гl}(X, \lambda) - P_{гl}(X, \lambda_{п1}) \\ Q'_{гфl} &= Q_{гl}(X, \lambda) - Q_{гl}(X, \lambda_{п1}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Предположим, что известен вектор параметров исходного до возмущения режима $X_{п1}$. При этом $\lambda = \lambda_{п1}$.

Изменение вектора параметров режима определяется формулой (см. [1] ф. (24)):

$$A_0 dX_1 = F_0, \quad (7)$$

где A_0 — матрица частных производных функций небалансов мощностей узловых точек (см. [1] ф. (5)) и вектор возмущения (см. [1] ф. (25))

$$F_0 = - (0, \dots, 0, P'_{гфк}, Q'_{гфк}, P'_{гфl}, Q'_{гфl}, 0, \dots, 0) \quad (8)$$

определяются с учетом функций (6) при $X = X_{п1}$.

Из (7) изменение вектора параметров режима:

$$dX = A_0^{-1} F_0, \quad (9)$$

где A_0^{-1} — обратная матрица матрицы A_0 .

Поскольку функции (6) являются, кроме параметров режима, еще функциями λ , то и частные производные функций (6) по параметрам режима являются функциями λ . Следовательно A_0 , A_0^{-1} и F_0 , а также на основе (9) dX оказываются функциями λ .

При отклонении λ от λ_{n1} функции (6), определяемые при X_{n1} , отклоняются от нуля. Одновременно отклоняются от нуля и F_0 на основе (8) и dX на основе (9).

Производная изменения вектора параметров режима dX по возмущающему фактору λ , определяемая в начале первого интервала, когда $\lambda = \lambda_{n1}$:

$$\begin{aligned} \left. \frac{d(dX)}{d\lambda} \right|_{\lambda = \lambda_{n1}} &= \lim_{\lambda \rightarrow \lambda_{n1}} \frac{dX - 0}{\lambda - \lambda_{n1}} = \\ &= \left. \frac{dX}{d\lambda} \right|_{\lambda = \lambda_{n1}} = \frac{dX_1}{d\lambda}, \end{aligned} \quad (10)$$

из которого вытекает, что $\left. \frac{d(dX)}{d\lambda} \right|_{\lambda = \lambda_{n1}}$ равна производной вектора параметров режима по возмущающему фактору, определяемая в начале первого интервала, $\frac{dX_1}{d\lambda}$.

С другой стороны, на основе (9):

$$\begin{aligned} \frac{dX_1}{d\lambda} &= A_0^{-1} \left|_{\lambda = \lambda_{n1}} \cdot \frac{dF_0}{d\lambda} \right|_{\lambda = \lambda_{n1}} + \\ &+ \frac{dA_0^{-1}}{d\lambda} \left|_{\lambda = \lambda_{n1}} \cdot F_0 \right|_{\lambda = \lambda_{n1}}. \end{aligned} \quad (11)$$

В формуле (11) $F_0 \left|_{\lambda = \lambda_{n1}} = 0$ на основе вышесказанного, $A_0^{-1} \left|_{\lambda = \lambda_{n1}}$ определяется только на основе функций небалансов мощностей до возмущения при $\lambda = \lambda_{n1}$ и $X = X_{n1}$, поскольку при $\lambda = \lambda_{n1}$ все частные производные функции (6) равны нулю; производная

вектора возмущения по возмущающему фактору на основе (8) и (6):

$$\begin{aligned} & \left. \frac{dF_0}{d\lambda} \right|_{\lambda = \lambda_{n1}} = \\ & = - (0, \dots, 0, \frac{dP_{гк}}{d\lambda}, \frac{dQ_{гк}}{d\lambda}, \frac{dP_{г1}}{d\lambda}, \frac{dQ_{г1}}{d\lambda}, 0, \dots, 0), \end{aligned} \quad (12)$$

где $\frac{dP_{гк}}{d\lambda}$, $\frac{dQ_{гк}}{d\lambda}$, $\frac{dP_{г1}}{d\lambda}$, $\frac{dQ_{г1}}{d\lambda}$ определяются при $\lambda = \lambda_{n1}$ и $X = X_{n1}$.

Следовательно,

$$\frac{dX_1}{d\lambda} = A_0^{-1} \frac{dF_0}{d\lambda}, \quad (13)$$

где A_0^{-1} и $\frac{dF_0}{d\lambda}$ определяются при $\lambda = \lambda_{n1}$ и $X = X_{n1}$.

Далее можно уравнение (13) привести к обычно более удобной форме для решения:

$$A_0 \frac{dX_1}{d\lambda} = \frac{dF_0}{d\lambda}, \quad (14)$$

где A_0 и $\frac{dF_0}{d\lambda}$ определяются при $\lambda = \lambda_{n1}$ и $X = X_{n1}$.

Изменение вектора параметров режима в интервале № 1 на основе (1):

$$dX_1 = \frac{dX_1}{d\lambda} \Delta\lambda_1, \quad (15)$$

где на основе (3) изменение возмущающего фактора в интервале № 1 $\Delta\lambda_1 = \frac{\Delta\lambda}{n}$.

Фактор возмущения в конце интервала № 1:

$$\lambda_1 = \lambda_{n1} + \Delta\lambda_1. \quad (16)$$

Вектор параметров режима в конце интервала № 1:

$$X_1 = X_{n1} + dX_1. \quad (17)$$

После этих общих соображений можно сформулировать вычислительную схему изменения вектора параметров режима в любом интервале № i .

Поскольку в начале интервала № i , т. е. при

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \lambda_{(i-1)} = (i-1) \frac{\Delta\lambda}{n} \\ X &= X_{(i-1)} \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

вектор небалансов мощностей F равен нулю, то изменение вектора параметров режима в интервале № i dX_i можно определить совершенно аналогично, как в интервале № 1, так как режим системы в начале интервала № i можно рассмотреть как режим до возмущения.

Следовательно, производная вектора параметров режима в начале интервала № i определяется уравнением:

$$A_{(i-1)} \frac{dX_i}{d\lambda} = \frac{dF_{(i-1)}}{d\lambda}, \quad (19)$$

где матрица A , обозначаемая как $A_{(i-1)}$, и производная вектора возмущения $\frac{dF}{d\lambda}$ (12), обозначаемая как $\frac{dF_{(i-1)}}{d\lambda}$, определяются при $\lambda = \lambda_{(i-1)}$ и $X = X_{(i-1)}$.

Изменение вектора параметров режима в интервале № i :

$$dX_i = \frac{dX_i}{d\lambda} \Delta\lambda, \quad (20)$$

где $\Delta\lambda_i = \frac{\Delta\lambda}{n}$.

Фактор возмущения в конце интервала № i :

$$\lambda_i = \lambda_{(i-1)} + \Delta\lambda_i. \quad (21)$$

Вектор параметров режима в конце интервала № i :

$$X_i = X_{(i-1)} + dX_i. \quad (22)$$

Изменение вектора параметров режима во всех n интервалах определяется так же, как в случае метода последовательных интервалов [1].

Очевидно также всё, сказанное в случае метода последовательных интервалов [1] относительно накопления ошибок в ходе вычислительного процесса, оптимального числа последовательных интервалов и возможности использования, является правильным и здесь.

Как из вычислительной схемы видно, вычислительный процесс, с одной стороны, упрощается по сравнению с методом последовательных интервалов в том отношении, что нет необходимости учитывать дополнительных мощностей фиктивных генераторов при определении матрицы A ; но, с другой стороны, этот процесс может усложняться в связи с вычислением $\frac{dF}{d\lambda}$, если функции эквивалентных генерируемых мощностей от λ вычисляются более трудоемко.

В. ВОЗМУЩЕНИЕ ПРОИСХОДИТ В ВИДЕ ВКЛЮЧЕНИЯ ФИКТИВНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ, УЧИТЫВАЮЩИХ ВКЛЮЧЕНИЕ И ОТКЛЮЧЕНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ, НАГРУЗОК И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ

Здесь можно отнести также случай изменения функций эквивалентных генерируемых мощностей уже включенных на работу генераторов, нагрузок и электрических связей, если этот вид возмущения легче учитывается включением фиктивных генераторов.

Включение фиктивного генератора в любой узел k с функциями мощностей $P'_{гфк}$ и $Q'_{гфк}$, учитывающего включение или отключение генератора или включение фиктивных генераторов в узлы k и l с функциями мощностей $P'_{гфк}$, $Q'_{гфк}$, $P'_{гфl}$, и $Q'_{гфl}$, учитывающих включение или отключение электрической связи, можно рассмотреть как результат последовательного включения $n \rightarrow \infty$ бесконечно малых фиктивных одинаковых генераторов с функциями мощностей:

$$\left. \begin{aligned} P_{гк} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{P'_{гфк}}{n}, & Q_{гк} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{Q'_{гфк}}{n} \\ P_{гl} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{P'_{гфl}}{n}, & Q_{гl} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{Q'_{гфl}}{n} \end{aligned} \right\}, \quad (23)$$

соответственно, или узел k или одновременно узлы k и l . Рассмотрим более общий случай включения одновременно в узлы k и l .

Обозначим суммы функций мощностей n' включенных бесконечно малых фиктивных генераторов:

$$\left. \begin{aligned} p'_{гк} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n'}{n} P'_{гфк}, & q'_{гк} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n'}{n} Q'_{гфк} \\ p'_{г1} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n'}{n} P'_{гф1}, & q'_{г1} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n'}{n} Q'_{гф1} \end{aligned} \right\}, \quad (24)$$

и тогда при изменении n' от 0 до ∞ $p'_{гк}$, $q'_{гк}$, $p'_{г1}$ и $q'_{г1}$ изменяются непрерывно линейно от 0 соответственно до $P'_{гфк}$, $Q'_{гфк}$, $P'_{гф1}$ и $Q'_{гф1}$.

При этом, $p'_{гк}$, $q'_{гк}$, $p'_{г1}$ и $q'_{г1}$ могут быть выражены линейной функцией любого из этих функций, например, $p'_{гк}$:

$$\left. \begin{aligned} p'_{гк}, q'_{гк} &= \frac{Q'_{гфк}}{P'_{гфк}} p'_{гк}, & p'_{г1} &= \frac{P'_{гф1}}{P'_{гфк}} p'_{гк} \\ q'_{г1} &= \frac{Q'_{гф1}}{P'_{гфк}} p'_{гк} \end{aligned} \right\}. \quad (25)$$

Так же определяются и частные производные функции (24) по любому параметру режима y :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p'_{гк}}{\partial y} &= \frac{\partial P'_{гфк}}{\partial y} p'_{гк}, & \frac{\partial q'_{гк}}{\partial y} &= \frac{\partial Q'_{гфк}}{\partial y} p'_{гк} \\ \frac{\partial p'_{г1}}{\partial y} &= \frac{\partial P'_{гф1}}{\partial y} p'_{гк}, & \frac{\partial q'_{г1}}{\partial y} &= \frac{\partial Q'_{гф1}}{\partial y} p'_{гк} \end{aligned} \right\}. \quad (26)$$

Изменение вектора параметров режима при включении бесконечно малых фиктивных генераторов определяется формулой (9), где обратная матрица A_0^{-1} матрицы A_0 определяется с учетом (26) и вектор возмущения (8) с учетом (25):

$$F_0 = -(0, \dots, 0, p'_{гк}, \frac{Q'_{гфк}}{P'_{гфк}} p'_{гк}, \frac{P'_{гф1}}{P'_{гфк}} p'_{гк}, \frac{Q'_{гф1}}{P'_{гфк}} p'_{гк}, 0, \dots, 0), \quad (27)$$

при $X = X_{n1}$.

При отклонении $p'_{гк}$ от нуля F_0 на основе (27) и dX на основе (9) также отклоняются от нуля. Поэтому суммарную активную мощность n' бесконечно малых фиктивных генераторов $p'_{гк}$, определяемую при векторе параметров исходного до возмущения режима X_{n1} , из

суммарной мощности $n \rightarrow \infty$ бесконечно малых фиктивных генераторов, учитывающих включение конечного фиктивного генератора, желательнее рассмотреть как фактор возмущения λ , т. е. $\lambda = p'_{гк}$.

До возмущения этот фактор возмущения $\lambda = \lambda_{п1} = 0$.

Следовательно, производная вектора параметров режима по $p'_{гк}$, определяемая при $p'_{гк} = 0$ или в начале первого интервала, определяется также на основе (14), т. е. уравнением:

$$A_0 \frac{dX_1}{dp'_{гк}} = \frac{dF_0}{dp'_{гк}}, \quad (28)$$

где A_0 — определяется без учета влияния возмущающих мощностей, так как при $p'_{гк} = 0$ все частные производные (26) равны нулю; производная вектора возмущения на основе (27):

$$\frac{dF_0}{dp'_{гк}} = -(0, \dots, 0, 1, \frac{Q'_{гфк}}{P'_{гфк}}, \frac{P'_{гф1}}{P'_{гфк}}, \frac{Q'_{гф1}}{P'_{гфк}}, 0, \dots, 0). \quad (29)$$

Производные $\frac{dX_1}{dp'_{гк}}$ и $\frac{dF_0}{dp'_{гк}}$ имеют еще и другое важное значение:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dX_1}{dp'_{гк}} &= \lim_{p'_{гк} \rightarrow 0} \frac{dX}{p'_{гк} - 0} = \frac{dX_1}{dP_{гк}} \\ \frac{dF_0}{dp'_{гк}} &= \lim_{p'_{гк} \rightarrow 0} \frac{F - 0}{p'_{гк} - 0} = \frac{dF_0}{dP_{гк}} \end{aligned} \right\}, \quad (30)$$

где dX и dF — малые изменения соответственно вектора параметров режима и вектора возмущения в результате малого возмущения в виде включения небольших фиктивных генераторов с функциями мощностей $p'_{гк}$, $q'_{гк}$, $p'_{г1}$ и $q'_{г1}$ в узлы k и l .

$dP_{гк}$ — значение активной мощности малого фиктивного генератора узла k после возмущения или **небаланс активных мощностей узла k** , если X равен вектору параметров режима после возмущения X_2 и небольшие фиктивные генераторы с функциями мощностей $p'_{гк}$, $q'_{гк}$, $p'_{г1}$ и $q'_{г1}$ не были бы включены.

Это обстоятельство можно доказать следующим образом. Пусть включаются фиктивные генераторы с функциями мощностей: $p'_{гк}(y_1, \dots, y_n)$, $q'_{гк}(y_1, \dots, y_n)$, $p'_{г1}(y_1, \dots, y_n)$, $q'_{г1}(y_1, \dots, y_n)$, где y_1, \dots, y_n — параметры режима.

Предположим, что до возмущения $y_1 = y_{11}, \dots, y_i = y_{i1}, \dots, y_n = y_{n1}$, а после возмущения $y_1 = y_{12}, \dots, y_i = y_{i2}, \dots, y_n = y_{n2}$; тогда

$$dP_{гк} = p'_{гк}(y_{12}, \dots, y_{n2}). \quad (31)$$

В формуле (30) $p'_{гк}$ определяется в этом случае как

$$p'_{гк} = p'_{гк}(y_{11}, \dots, y_{n1}). \quad (32)$$

Следовательно, при конечном значении (32)

$$p'_{гк}(y_{11}, \dots, y_{n1}) \neq dP_{гк}. \quad (33)$$

$dP_{гк}$ можно выразить через $p'_{гк}(y_{11}, \dots, y_{n1})$:

$$\begin{aligned} dP_{гк} &= p'_{гк}(y_{12}, \dots, y_{n2}) = \\ &= p'_{гк}(y_{11}, \dots, y_{n1}) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial p'_{гк}}{\partial y_i} dy_i, \end{aligned} \quad (34)$$

где $\frac{\partial p'_{гк}}{\partial y_i}$ — определяется при y_{11}, \dots, y_{n1} ,

$dy_i = y_{i2} - y_{i1}$ — отклонение параметра режима y_i в результате возмущения.

При малом возмущении на основе (1) или (15)

$$dy_i = \frac{dy_i}{dp'_{гк}} p'_{гк}(y_{11}, \dots, y_{n1}). \quad (35)$$

Подставляя (35) в (34), получим:

$$\begin{aligned} dP_{гк} &= p'_{гк}(y_{12}, \dots, y_{n2}) = \\ &= p'_{гк}(y_{11}, \dots, y_{n1}) \left[1 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial p'_{гк}}{\partial y_i} \frac{dy_i}{dp'_{гк}} \right]. \end{aligned} \quad (36)$$

Если $p'_{гк}(y_{11}, \dots, y_{n1}) \rightarrow 0$, то на основе (26),

$\frac{\partial p'_{гк}}{\partial y_i} \rightarrow 0$ и, следовательно, на основе (36):

$$dP_{гк} = p'_{гк}(y_{12}, \dots, y_{n2}) \rightarrow p'_{гк}(y_{11}, \dots, y_{n1}), \quad (37)$$

что и требовалось доказать.

С учетом (30) полученный результат можно сформулировать следующим образом.

Изменение вектора параметров режима в результате включения небольших фиктивных генераторов в узлы k и l с функциями мощностей $P'_{гfk}$, $Q'_{гfk}$, $P'_{гfl}$ и $Q'_{гfl}$, учитывающих возмущение в виде одновременного включения отдельных элементов электрической системы, определяется формулой:

$$dX = \frac{dX_1}{dP_{гk}} P'_{гfk}, \quad (38)$$

где $\frac{dX_1}{dP_{гk}}$ определяется уравнением:

$$A_0 \frac{dX_1}{dP_{гk}} = \frac{dF_0}{dP_{гk}}. \quad (39)$$

В уравнении (39) A_0 определяется без учета возмущающих мощностей, а производная $\frac{dF_0}{dP_{гk}}$ на основе (29) формулой:

$$\frac{dF_0}{dP_{гk}} = - (0, \dots, 0, 1, \frac{Q'_{гfk}}{P'_{гfk}}, \frac{P'_{гfl}}{P'_{гfk}}, \frac{Q'_{гfl}}{P'_{гfk}}, 0, \dots, 0). \quad (40)$$

В (38), (39) и (40) A_0 , $P'_{гfk}$, $Q'_{гfk}$, $P'_{гfl}$ и $Q'_{гfl}$ определяются при векторе параметров режима до возмущения $X_{п1}$.

Совершенно аналогичные результаты можно получить, если брать вместо мощности $p'_{гk}$ возмущающим фактором какую-либо другую мощность из мощностей (24).

Например, если $\lambda = q'_{гk}$, то формулы (38), (39) и (40) принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} dX &= \frac{dX_1}{dQ_{гk}} Q'_{гfk} \\ A_0 \frac{dX_1}{dQ_{гk}} &= \frac{dF_0}{dQ_{гk}} \\ \frac{dF_0}{dQ_{гk}} &= - (0, \dots, 0, \frac{P'_{гfk}}{Q'_{гfk}}, 1, \frac{P'_{гfl}}{Q'_{гfk}}, \frac{Q'_{гfl}}{Q'_{гfk}}, 0, \dots, 0) \end{aligned} \right\}, \quad (41)$$

где A_0 определяется также без учета возмущающих мощностей при $X_{п1}$.

Возмущающим фактором желательно выбрать ту из мощностей (24), в случае которой отношения $\frac{Q'_{гфк}}{P'_{гфк}}$, $\frac{P'_{гф1}}{P'_{гфк}}$ и $\frac{Q'_{гф1}}{P'_{гфк}}$ меньше единицы. Если $P'_{гфк}$ значительно больше мощностей $Q'_{гфк}$, $P'_{гф1}$ и $Q'_{гф1}$, то в формуле (38) необходимо вычислить и умножить очень большие компоненты вектора $\frac{dX}{dP_{гк}}$ на весьма малое число $P'_{гфк}$, что затрудняет точное вычисление.

В случае же возмущения в виде изменения функций мощностей уже включенных на работу элементов электрической системы, если эти возмущения можно проще учитывать включением конечных небольших фиктивных генераторов, определение изменения вектора параметров режима dX можно также вести на основе (38), (39) и (40).

Единственная разница заключается только в том, что производные $\frac{dX_1}{dP_{гк}}$ и $\frac{dF_0}{dP_{гк}}$ сохраняют теоретически строго свое значение (30) только при малых конечных значениях $P'_{гфк}$, $Q'_{гфк}$, $P'_{гф1}$ и $Q'_{гф1}$, так как только в том случае линейная зависимость между $P'_{гк}$, $Q'_{гк}$, $P'_{г1}$ и $Q'_{г1}$ соответствует такой же линейной зависимости между $P'_{гфк}$, $Q'_{гфк}$, $P'_{гф1}$ и $Q'_{гф1}$ и при изменении λ от $\lambda_{п1}$ до конечного значения λ_1 после возмущения (см. (6)). При больших возмущениях линейная зависимость между $P'_{гк}$, $Q'_{гк}$, $P'_{г1}$ и $Q'_{г1}$ уже не соответствует достаточно точно линейной зависимости между $P'_{гфк}$, $Q'_{гфк}$, $P'_{гф1}$ и $Q'_{гф1}$ при малом отклонении λ от $\lambda_{п1}$.

В случае больших возмущений в виде включения больших фиктивных генераторов можно использовать метод последовательных интервалов. Используя для упрощения вычисления изменения вектора параметров режима в каждом интервале в результате включения небольших фиктивных генераторов формулы (38), (39)

и (40), можно получить вычислительную схему на основе усовершенствованного метода последовательных интервалов.

Изменение вектора параметров режима в интервале № i определяется следующим образом:

Из расчета в интервале № $(i-1)$ известен $X_{(i-1)}$.

В интервале № i включаются фиктивные генераторы с функциями мощностями (см. [1], ф. (31)):

$$\left. \begin{aligned} p_{гк} &= \frac{P'_{гфк}}{n}, & q_{гк} &= \frac{Q'_{гфк}}{n} \\ p_{г1} &= \frac{P'_{гф1}}{n}, & q_{г1} &= \frac{Q'_{гф1}}{n} \end{aligned} \right\}, \quad (42)$$

где n — число последовательных интервалов.

На основе (38) и (42):

$$dX_i = \frac{dX_i}{dP_{гк}} \frac{P'_{гфк}}{n}, \quad (43)$$

где $\frac{dX_i}{dP_{гк}}$ и $P'_{гфк}$ определяются при $X_{(i-1)}$.

На основе (39) $\frac{dX_i}{dP_{гк}}$ определяется уравнением:

$$A_{(i-1)} \frac{dX_i}{dP_{гк}} = \frac{dF_{(i-1)}}{dP_{гк}}. \quad (44)$$

$A_{(i-1)}$ определяется без учета возмущающих мощностей фиктивных небольших генераторов интервала № i , но с учетом мощностей фиктивных генераторов, включенных в предыдущих $(i-1)$ интервалах:

$$\left. \begin{aligned} p_{г\sigma к} &= \frac{i-1}{n} P'_{гфк}, & q_{г\sigma к} &= \frac{i-1}{n} Q'_{гфк} \\ p_{г\sigma 1} &= \frac{i-1}{n} P'_{гф1}, & q_{г\sigma 1} &= \frac{i-1}{n} Q'_{гф1} \end{aligned} \right\}, \quad (45)$$

и определяемых при $X_{(i-1)}$.

На основе (40) и (42) $\frac{dF_{(i-1)}}{dP_{гк}}$ сохраняет вид (40) т. е.

$$\frac{dF_{(i-1)}}{dP_{гк}} = - (0, \dots, 0, 1, \frac{Q'_{гфк}}{P'_{гфк}}, \frac{P'_{гф1}}{P'_{гфк}}, \frac{Q'_{гф1}}{P'_{гфк}}, 0, \dots, 0), \quad (46)$$

определяемый при $X_{(i-1)}$.

Суммарное изменение возмущающего фактора во всех интервалах измеряется мощностями больших генераторов после возмущения.

Здесь являются правильными все замечания, сделанные в части А относительно оптимального числа последовательных интервалов и использования метода.

ВЫВОДЫ

1. Усовершенствованный метод последовательных интервалов является дальнейшим развитием метода последовательных интервалов. Во многих случаях он позволяет проще выполнить те же функции, что и метод последовательных интервалов.

2. Кроме того, усовершенствованный метод последовательных интервалов значительно расширяет область использования метода последовательных интервалов, так как допускает в каждом интервале определение скорости изменения стационарного режима по любому возмущающему фактору $-\frac{dX}{d\lambda}$. Это имеет большое значение с точки зрения определения допустимых изменений возмущающих факторов и расчета статической устойчивости и экономического распределения активных и реактивных мощностей.



ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Крумм. 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.
2. 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.

SUMMARY

The paper offers an improved method of successive intervals as a further development of this, simple method.

This new method is used for defining the variations of the electrical system stationary regime by any symmetrical indignation, wherein also the load and generating units static characteristics and the automatic control of frequency, tension and power are taken into account.

In many cases this method allows to fulfill easier the functions of the method of successive intervals.

In addition it widens the field of using the simple method of successive intervals, as it allows to define the speed of the regime change by any indignating agent. This is of great importance from the point of view of defining the permissible changes of the indignating agents and calculating the static stability and economical distribution of power.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
А. Возмущающим фактором λ является параметр, изменение которого вызывает изменение функций мощностей уже включенных на работу генераторов, нагрузок и электрических связей переменного и постоянного тока	4
В. Возмущение происходит в виде включения фиктивных генераторов, учитывающих включение и отключение генераторов, нагрузок и электрических связей	10
Выводы	17
Литература	18
Резюме на английском языке	18

Л. А. Крумм

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

*

Издательство
Таллинского Политехнического Института

Редактор Б. Тамм

Технический редактор А. Тамм

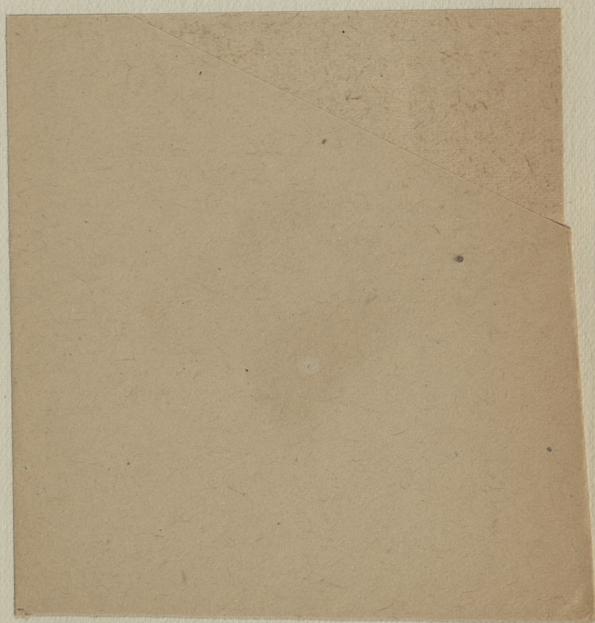
Корректор О. Терно

Подписано к печати 26. XII 1957. Бумага $54 \times 84^{1/16}$. Печатных листов 1,25. По формату 60×92 печатных листов 1,03. Учетно-издательских листов 0,74. Тираж 800. Заказ № 833. МВ-09048.

Типография Управления Делами СМ ЭССР, Таллин.

Цена 55 коп.





Цена 55 коп.

EESTI AKADEEMILINE RAAMATUKOGU



1 0200 00089255 8