

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Чернин А.Б., Лосев С.Б. Основы вычислений электрических величин для релейной защиты при сложных повреждениях в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 439 с.
2. Ульянов С.А. Короткие замыкания в электрических системах. – М.: Госэнергоиздат, 1958. – 280 с.
3. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
4. Лоханин Е.К., Глаголев В.А., Скрыпник А.И. Моделирование синхронных машин // Энергосистема: управление, конкуренция, образование: Сб. докл. III Междунар. научно-техническая конф. – Т. 1. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – 453 с.
5. Эксплуатация турбогенераторов с непосредственным охлаждением / под общей ред. Л.С. Линдорфа и Л.Г. Мамикоянца. – М.: Энергия, 1972. – 352 с.
6. Вайнштейн Р.А., Лозинский К.С., Иванов В.П., Кобытев М.И. Усовершенствование расчетов несимметричных режимов в программах расчета электромеханических переходных процессов // Электричество. – 2008. – № 7. – С. 19–23.

Поступила 15.03.2010 г.

УДК 621.311.016.361

**ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСИСТЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ**

В.И. Готман, А.В. Глазачев

Томский политехнический университет  
E-mail: mo@elti.tpu.ru

*Рассматривается расчет пропускной способности системообразующей связи энергосистемы по условиям статической аperiodической устойчивости. Для решения задачи предложено представлять энергосистему в виде трехузловой схемы. Приводится методика эквивалентирования энергосистемы на основе её режимных параметров.*

**Ключевые слова:**

*Энергосистема, статическая устойчивость, эквивалентирование, статические характеристики, пропускная способность, критическое напряжение.*

**Key words:**

*Power system, static stability, making equivalent, static characteristics, transmission capacity, critical voltage.*

**Введение**

Современные энергообъединения имеют большую размерность и содержат до 10<sup>4</sup> узлов. Вопросы их эквивалентирования являются актуальными [1], поскольку позволяют существенно снизить размерность исследуемой энергосистемы и локализовать интересующий объект. Рассматриваемый ниже способ эквивалентирования целесообразен для решения задач повышения пропускной способности системообразующих связей, оценки статической аperiodической устойчивости энергообъединений.

Статическая устойчивость характеризуется коэффициентом запаса по мощности  $P$  в контролируемой связи или по напряжению  $U$  узла

$$K_p = (P_{\max} - P)/P, \quad K_U = (U - U_{кр})/U,$$

где  $P, U$  – мощность и напряжение в исходном режиме;  $P_{\max}, U_{кр}$  – предельная мощность и критическое напряжение по условиям статической устойчивости;  $K_p, K_U$  – коэффициенты запаса устойчивости по соответствующим параметрам.

Ниже рассматривается возможность оценки пропускной способности системообразующей связи энергосистемы по условиям статической аperiodической устойчивости на базе представления исходной схемы эквивалентной.

**Параметры эквивалента энергосистемы**

На рисунке, *a*, приведена условная схема энергосистемы произвольной структуры, в которой контролируемой связью по мощности считаем  $j-3$  и по напряжению – нагрузочный узел 3. Исходная схема может быть приведена к эквивалентной трехузловой (рисунок, *b*). В этой схеме в «чистом» виде выделено примыкание контролируемой связи к узлу 3; все прочие примыкания к этому узлу представлены результирующей связью. Для общности считаем, что в узле 3 есть собственная нагрузка  $\bar{S}_{н3}$ , которая в неизменном виде входит в эквивалентную схему. Эквивалентирование схемы осуществляется на следующих предпосылках.

Установившийся режим энергосистемы характеризуется значениями активных  $P_{ij}$  и реактивных  $Q_{ij}$  мощностей по ветвям и векторами напряжений  $U_i$  узлов. Эта информация может быть дополнена производными  $\alpha_{ij} = dP_{ij}/dU_i, \beta_{ij} = dQ_{ij}/dU_i$ , которые по существу представляют коэффициенты крутизны обобщенных статических характеристик соответственно по активной и реактивной мощностям относительно узла  $i$  [2].

Части исходной схемы со стороны связи  $j-3$  по известным значениям параметров  $U_3, P_3, Q_3, \alpha_3, \beta_3$  можно поставить в соответствие эквивалент в виде

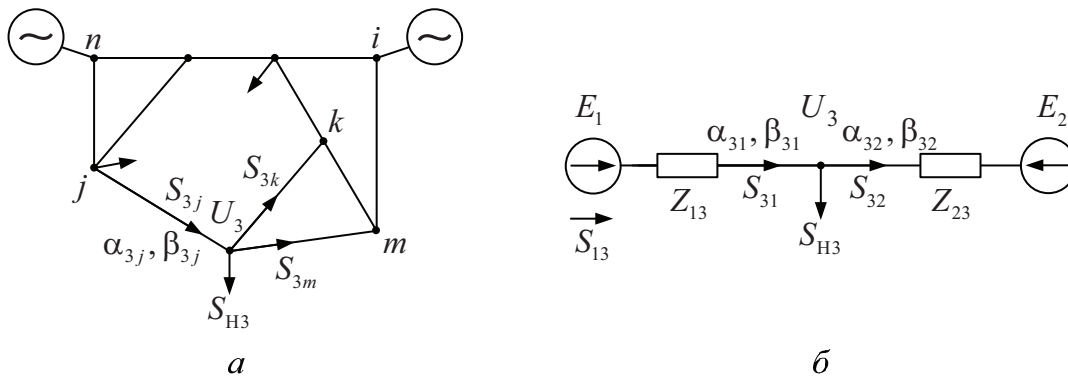


Рисунок. Структурная схема энергосистемы (а) и эквивалентная трехузловая схема (б)

четыреполюсника, содержащего продольную ветвь комплексного сопротивления ( $Z_{31}, \Psi_{31}$ ), к свободному концу которой приложена неизменная эквивалентная ЭДС ( $E_1 = \text{const}$ ). Для узла примыкания (3) эквивалентной ветви соблюдаются те же значения параметров режима ( $U_3, P_{31}, Q_{31}, \alpha_{31}, \beta_{31}$ ), что и для исходной схемы ( $U_3, P_{3j}, Q_{3j}, \alpha_{3j}, \beta_{3j}$ ). Известно, что в основе условия устойчивости лежит реакция системы на внешнее возмущение. Важным является то, что при наличии возмущения в узле 3 эквивалентные четырехполюсники будут оказывать ту же реакцию, что и исходная схема.

Согласно сформулированной задаче для эквивалентной ветви (1–3) относительно узла её примыкания можно записать два независимых уравнения для мощности (условные обозначения общепринятые)

$$P_{31} = U_3^2 g_{13} + E_1 U_3 Y_{13} \sin(\delta_{31} - \alpha_{z13}), \quad (1)$$

$$Q_{31} = U_3^2 b_{13} - E_1 U_3 Y_{13} \cos(\delta_{31} - \alpha_{z13}) \quad (2)$$

и два уравнения для коэффициентов крутизны  $\alpha_{31}, \beta_{31}$  [3] статических характеристик  $P_{31}(U_3), Q_{31}(U_3)$ :

$$\alpha_{31} = \frac{\frac{\partial P_{31}}{\partial U_3} \frac{\partial P_{13}}{\partial \delta_1} - \frac{\partial P_{13}}{\partial U_3} \frac{\partial P_{31}}{\partial \delta_1}}{\frac{\partial P_{13}}{\partial \delta_1}}, \quad (3)$$

$$\beta_{31} = \frac{\frac{\partial Q_{31}}{\partial U_3} \frac{\partial P_{13}}{\partial \delta_1} - \frac{\partial P_{13}}{\partial U_3} \frac{\partial Q_{31}}{\partial \delta_1}}{\frac{\partial P_{13}}{\partial \delta_1}}. \quad (4)$$

Параметры левой части выражений (1)–(4) считаются величинами известными и равными соответствующим переменным для некоторого установившегося режима эквивалентруемой системы ( $P_{31} = P_{3j}, Q_{31} = Q_{3j}, \alpha_{31} = \alpha_{3j}, \beta_{31} = \beta_{3j}$ ). Расчет коэффициентов  $\alpha_{3j}, \beta_{3j}$  по аналитическим выражениям является весьма сложной и трудоемкой процедурой [2]. Наиболее практично определять эти коэффициенты методом численного дифференцирования. Для этого рассчитывают два режима при вариации напряжения для исходного состояния на малую величину  $\pm \Delta U$ ; в этих расчетах узел 3 принимается балансирующим по активной и реактивной мощностям:

$$\alpha_{3j} = \frac{P_{3j}^{(i)} - P_{3j}^{(i+1)}}{U_3^{(i)} - U_3^{(i+1)}}, \quad \beta_{3j} = \frac{Q_{3j}^{(i)} - Q_{3j}^{(i+1)}}{U_3^{(i)} - U_3^{(i+1)}}.$$

Система уравнений (1)–(4) является замкнутой и содержит четыре параметра эквивалента:  $E_1, Y_{13}, \alpha_{z13}, \delta_{31} = \delta_3 - \delta_1$ , которые подлежат расчету.

Дополним записанную систему уравнением активной мощности эквивалентного источника питания:

$$P_{13} = E_1^2 g_{13} + E_1 U_3 Y_{13} \sin(\delta_{13} - \alpha_{z13}). \quad (5)$$

Выражения частных производных в (3), (4) находятся прямым дифференцированием функционалов (1), (2), (5) по независимым переменным, что позволяет представить коэффициенты  $\alpha_{31}, \beta_{31}$  в следующем виде:

$$\alpha_{31} = 2U_3 g_{13} - \frac{E_1 Y_{13} \sin 2\alpha_{z13}}{\cos(\delta_{13} - \alpha_{z13})}, \quad (6)$$

$$\beta_{31} = 2U_3 b_{13} - \frac{E_1 Y_{13} \cos 2\alpha_{z13}}{\cos(\delta_{13} - \alpha_{z13})}. \quad (7)$$

Совместное решение уравнений (1), (2), (6), (7) позволяет найти параметры эквивалента.

Дополнительный угол  $\alpha_{z13}$  аргумента сопротивления находится из выражения:

$$\sin(2\alpha_{z13} + \gamma) = B/A,$$

где

$$\sin \gamma = (B - 0,5U_3 \alpha_{31}^2) / A,$$

$$\cos \gamma = (0,5U_3 \alpha_{31} \beta_{31}) / A,$$

$$A = \sqrt{(B - 0,5U_3 \alpha_{31}^2)^2 + (0,5U_3 \alpha_{31} \beta_{31})^2}, \quad (8)$$

$$I_{31}^2 = (S_{31}/U_3)^2.$$

Каждое из выражений (8) дает значение только острого угла  $\gamma$ . Совместное использование этих выражений позволяет установить квадрант расположения угла  $\gamma$ , а, следовательно, его величину с учетом знака. Зная  $\alpha_{z13}$ , можно рассчитать модуль сопротивления:

$$Z_{13} = \frac{2U_3 \sin \alpha_{z12}}{\beta_{31} \sin 2\alpha_{z13} - \alpha_{31} \cos 2\alpha_{z13}}. \quad (9)$$

Этим выражением следует пользоваться с определенной осторожностью, поскольку оно очень чувствительно к значению коэффициента  $\alpha_{13}$  и угла  $\alpha_{z13}$ . В частном случае при неучете активных сопротивлений в эквивалентируемой системе значения  $\alpha_{13}=0$  и  $\alpha_{z13}=0$ , а выражение (9) дает неопределенность вида 0/0. Поэтому модуль  $Z_{13}$  более целесообразно определять по формуле:

$$Z_{13} = \frac{U_3^2 \beta_{31} \cos \alpha_{z13}}{2B \cos 2\alpha_{z13}} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4B \cos 2\alpha_{z13}}{\beta_{31}^2 U_3^2 \cos \alpha_{z13}}} \right].$$

Знак перед радикалом берется противоположным знаком  $\beta_{31}$ . Вектор ЭДС может быть найден непосредственно из комплексного выражения

$$\bar{E}_1 = \bar{U}_3 + \bar{I}_{31} Z_{13},$$

где  $\bar{I}_{31} = \hat{S}_{31} / \hat{U}_3$ ,  $\bar{S}_{31} = P_{31} + jQ_{31}$ .

Аналогичным образом находится эквивалент со стороны связей 3–*m* и 3–*k* исходной схемы.

Эквиваленты совершенно строго отражают статические свойства системы для того режимного состояния, по параметрам которого они рассчитаны. По мере изменения режима будет изменяться напряжение в узле 3 и обменные потоки мощности по примыкающим связям. При этом естественно возникает вопрос: будут ли параметры эквивалента, найденные по результатам одного режимного состояния оставаться неизменными для всего многообразия режимных состояний энергосистемы или по мере изменения режима эти параметры следует корректировать? Ответ на поставленный вопрос сводится к установлению адекватности между обобщенными статистическими характеристиками рассматриваемой системы относительно узла эквивалентирования и результирующими статическими характеристиками эквивалентов.

Эквивалентируемая система представляет сочетание генераторных, нагрузочных узлов и пассивной части электрической сети, которая является передаточным звеном между указанными элементами и узлом эквивалентирования. Превалирующая доля активной и реактивной мощностей в обобщенных статистических характеристиках и их коэффициентах крутизны обусловлена генерирующими источниками, имеющими  $U_r = \text{const}$ , и пассивной частью подсистемы, параметры которой ( $Z$ ,  $Y$ ) постоянны. Совокупность этих элементов не меняет параметров эквивалентов для всех режимных состояний.

Вторая часть обобщенных статистических характеристик обусловлена мощностью нагрузочных узлов с учетом их регулирующих эффектов. Представление нагрузки в исходной схеме комплексными сопротивлениями на землю гарантирует постоянство эквивалента для всего многообразия вариаций напряжения в узле эквивалентирования.

Нагрузка, учитываемая в исходной схеме статическими характеристиками, в свою очередь, на основе подхода, изложенного выше, аналогичным

образом может быть представлена продольной ветвью неизменного сопротивления и ЭДС. Эта схема представления нагрузки на значительном диапазоне изменения напряжения ( $\Delta U$ ) в узле её подключения будет отражать ту же зависимость, что и её реальные статические характеристики. Диапазоны изменения напряжения в узлах системы в дифференциальной форме связаны условием

$$\Delta U_j = (dU_j / dU_i) \Delta U_i.$$

При изменении перетока мощности по контролируемой связи 3–*j* исходной схемы наибольшее изменение напряжения имеет место в узле 3, принятого за опорный узел при эквивалентировании. По мере удаления от него этот диапазон сокращается практически до нуля в узлах присоединения элементов с автоматическим регулированием напряжения. Следовательно, на интервале  $\Delta U_i$ , соответствующего  $\Delta U_j$ , в пределах которого нагрузка может быть представлена активным четырехполосником, справедливы неизменные значения параметров рассматриваемого эквивалента энергосистемы.

Наконец, если нагрузка моделируется неизменными величинами активной и реактивной мощности, то для значений напряжения в узле 3, отличных от расчетного, параметры эквивалента будут изменяться. Такая модель нагрузки используется редко и как показывают исследования, «деформация» параметров эквивалента при изменении напряжения незначительна. Как показывают численные расчеты [4], при таком моделировании нагрузки на интервале реального диапазона изменения напряжения, равного  $\pm 8\%$ , можно пользоваться неизменными значениями параметров эквивалентирования.

### Оценка статической устойчивости

В силу адекватности эквивалентной и исходной схем предельный режим участка 1–3 соответствует предельному режиму контролируемой связи 3–*j* исходной схемы. Для эквивалентной схемы справедлива следующая система уравнений:

$$\bar{E}_1 = \bar{U}_3 + \bar{I}_{31} Z_{13}, \quad \bar{E}_2 = \bar{U}_3 - \bar{I}_{32} Z_{23}, \quad \bar{S}_{H3} = (\bar{S}_{31} - \bar{S}_{32}).$$

Совместное решение этих уравнений позволяет получить выражение для потока  $P_{31}$  в функции схемных и режимных параметров:

$$P_{31} = (0,5dc - U_3^2 b_{13}) + a \sqrt{(E_1 U_3)^2 / Z_{13}^2 (a^2 + c^2) - 0,25d^2}, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} a &= U_3^2 (b_{13} + b_{23} + b_{H3}) = U_3^2 b_3, \\ c &= U_3^2 (g_{13} + g_{23} + g_{H3}) = U_3^2 g_3, \\ d &= 1 + (E_1^2 Y_{13}^3 - E_2^2 Y_{23}^3) U_3^2 / (a^2 + c^2), \quad b_{13} = x_{13} / z_{13}^2, \\ b_{23} &= x_{23} / z_{23}^2, \quad b_{H3} = Q_{H3} / U_3^2, \quad Y_{ij} = 1 / Z_{ij}, \\ g_{13} &= r_{13} / z_{13}^2, \quad g_{23} = r_{23} / z_{23}^2, \quad g_{H3} = P_{H3} / U_3^2. \end{aligned}$$

В приведенных выражениях нагрузка узла 3 представлена поперечной проводимостью.

Пределу передаваемой мощности соответствует критическое напряжение  $U_{3(\text{кр})}$ , которое находится из условия  $dP_{31}/dU_3=0$  и определяется выражением

$$U_{3(\text{кр})} = \sqrt{\frac{(E_1 Y_{13})^2 + (E_2 Y_{23})^2}{Y_3^2}},$$

где  $Y^2 = g_3^2 + b_3^2$ .

По известному значению  $U_{3(\text{кр})}$  из (10) находится предельное значение передаваемой мощности по контролируемой связи

$$P_{31(\text{max})} = \frac{1}{Y_3^2} [E_1^2 Y_{13}^2 g_3 - (E_1^2 Y_{13}^2 + E_2^2 Y_{23}^2) b_{13} + E_1 E_2 Y_{13} Y_{23} b_3].$$

Границе статической апериодической устойчивости энергосистемы соответствует равенство нулю свободного члена характеристического уравнения ( $a_n$ ). При строгом решении задачи приходится рассчитывать серию утяжеленных режимов и осуществлять их проверку по условию  $a_n > 0$ . Выражение  $a_n$  весьма громоздко и требует значительных вычислений. На практике предельный по устойчи-

вости режим определяется по признаку расходимости специальным образом организованного итерационного процесса [5]. Предложенный способ расчета предела передаваемой мощности согласуется с принятой концепцией расчета границы устойчивости энергосистем большой размерности.

#### Выводы

Рассмотрен расчет пропускной способности системообразующей связи энергосистемы по условиям статической устойчивости на базе эквивалентного представления электроэнергетической системы. Показано, что замещение частей электрической системы эквивалентными четырехполюсниками с заданными статическими характеристиками и коэффициентами крутизны позволяет существенно сократить размерность электроэнергетической системы. Это дает возможность в обобщенной форме учесть реакцию отдельных частей системы на внешнее возмущение и локализовать исследуемый объект. Такой подход возможен как в решении задачи оценки пропускной способности системообразующих электропередач, так и в разработке мероприятий по повышению устойчивости энергосистем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заповодников К.И. Синтез малоагрегатных эквивалентов сложных электроэнергетических систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2002. – 22 с.
2. Готман В.И., Маркман Г.З. Обобщенные статические характеристики электроэнергетических подсистем и их коэффициенты крутизны // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 4. – С. 131–134.
3. Готман В.И. Особенности управления и построения единой энергосистемы Азиатской части СССР на базе обобщенных статических характеристик. – Томск: Изд-во ТПУ, 1977. – 96 с.

4. Готман В.И., Готман О.В. Эквивалентирование подсистем энергообъединений на базе режимных параметров // Известия вузов. Электромеханика. – 2006. – № 3. – С. 111–114.
5. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчет устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.

Поступила 08.02.2010 г.

УДК 681.51:681.3

## РЕЛЕЙНО-ЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ БЕСЩЕТОЧНЫМИ СИНХРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Ю.Н. Хижняков, А.А. Южаков

Пермский государственный технический университет

E-mail: luda@at.pstu.ac.ru

Рассмотрен релейно-логический метод управления параллельной работой бесщеточных синхронных генераторов в режиме параллельной работы с сетью в полярной системе координат. Разработаны варианты структурных схем и алгоритмы управления. Достоинством метода является применение «сильного» регулирования, которое обеспечивает равномерное распределение реактивной и активной мощности между бесщеточными синхронными генераторами с квазистатическими внешними характеристиками.

### Ключевые слова:

Бесщеточный синхронный генератор, релейно-логический метод, блок динамического приоритета, выявитель, датчики модуля полного тока статора, датчики активного тока статора, блок пороговых элементов, полярная система координат, алгоритм управления.

### Key words:

Brushless synchronous generator, relay-logical method, dynamical priority unit, detector, full stator current module sensors, active stator current sensors, threshold elements unit, polar coordinate system, scheduling algorithm.

### Введение

В настоящее время разными фирмами выпускаются блочно-контейнерные газотурбинные электростанции (ГТЭС). Разработанные ГТЭС мощностью 2,4...63 МВт применяются для электроснабжения потребителей районов, где отсутствуют линии электропередач высокого напряжения, либо там, где их экономически целесообразно устанавливать дополнительно. ГТЭС содержит в себе несколько бесщеточных синхронных генераторов (БЩСГ) с воздушным охлаждением, которые приводятся во вращение газотурбинными установками на базе авиационных двигателей. БЩСГ является преобразователем механической энергии, вырабатываемой авиационным двигателем, в электрическую энергию. Мощность авиационного двигателя примерно равна мощности БЩСГ. Общими требованиями к ГТЭС являются параллельная работа нескольких БЩСГ на нагрузку в автономном режиме и с участием сети бесконечной мощности при выполнении всех требований по качеству вырабатываемой электроэнергии согласно ГОСТ 13109–97.

Традиционно управление параллельной работой синхронных генераторов малой и средней мощности выполняется по методу внутреннего статизма [1]. По этому методу статизм внешних характеристик генераторов должен быть не менее 6 %.

С целью повышения точности распределения реактивных и активных составляющих токов нагрузки между БЩСГ предлагается релейно-логический метод (РЛМ) [2].

РЛМ есть метод управления параллельной работой БЩСГ, где релейно сравниваются относительные токи статора параллельно работающих генераторов с последующей логической обработкой сигналов. Рассмотрим варианты реализации структурных схем и алгоритмов управления параллельной работой БЩСГ с сетью в полярной системе координат:

А. Особенностью управления параллельной работой БЩСГ с сетью бесконечной мощности в полярной системе координат (ПСК) является сравнение векторов полного тока статоров БЩСГ через сравнение интервалов времени  $\Delta t$ , пропорциональных фазовым сдвигам между токами и напряжением одноименной фазы статоров БЩСГ, и релейно-логическое сравнение модулей полного тока.

Известно, что напряжение фазы «а» на шинах генераторов изменяется по закону  $u_a = U_m \sin \omega t$ , а ток, например, в фазе «а»  $i_a = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ . В момент прохождения тока  $i_a$  через нуль, следует

$$\begin{aligned} i_a(\Delta t) &= I_m \sin(\omega \Delta t - \varphi) = 0; \\ (\omega \Delta t - \varphi) &= 0 \text{ или } \varphi = \omega \Delta t, \end{aligned} \quad (1)$$

т. е. фазовый сдвиг  $\varphi$  между напряжением и током пропорционален временному интервалу  $\Delta t$  между моментами времени перехода кривых напряжения  $u_a$  и тока  $i_a$  через нуль;  $\omega$  – круговая частота. Очевидно также, что активная и реактивная мощности фазы генератора определяются по формулам (2) [3]:

$$\begin{aligned} P &= UI \cos \varphi; \\ Q &= UI \sin \varphi. \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда угол сдвига между вектором напряжения и вектором тока одноименной фазы первого генератора определяется по формуле (3)

$$\varphi_1 = \arccos \frac{I_{a1}}{I_1} = \arcsin \frac{I_{p1}}{I_1}, \quad (3)$$

где  $I_{a1}$ ,  $I_{p1}$  – активная и реактивная составляющие тока первого генератора.  $I_1$  – модуль полного тока первого генератора.

Подставив (3) в (1), получим временной интервал  $\Delta t_1$

$$\Delta t_1 = \frac{1}{\omega_1} \arccos \frac{I_{a1}}{I_1} = \frac{1}{\omega_1} \arcsin \frac{I_{p1}}{I_1}. \quad (4)$$