

УДК 621.3.078

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРОВ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ, ОСНОВАННОЙ НА НАЛОЖЕНИИ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ТОКА С ЧАСТОТОЙ 25 Гц

Р.А. Вайнштейн, Р.Б. Тентиев, С.М. Юдин

Томский политехнический университет

E-mail: Renat@elti.tpu.ru

*Предлагается и обосновывается возможность увеличения контрольного тока, получаемого от специального источника, применяемого для защиты от замыканий на землю и выполненного на базе электромагнитного делителя частоты, без увеличения расхода активных материалов и габаритов источника.*

В электроустановках трехфазного переменного тока наиболее частым видом повреждения является замыкание одной фазы на заземленные элементы, называемое замыканием на землю. Возможный способ выявления элемента электроустановки, в котором произошло замыкание на землю, решающим образом зависит от режима заземления нейтрали. В некоторых случаях, например, при заземлении нейтрали через дугогасящие реакторы (ДГР) с целью компенсации емкостного тока замыкания, выполнение защиты с использованием электрических величин промышленной частоты затруднительно.

Типичным и важным случаем электроустановок с компенсацией емкостного тока являются блочные схемы соединения генераторов с повышающим трансформатором, в которых два и более генератора включены параллельно на одну обмотку низкого напряжения трансформатора.

В качестве примера на рис. 1 приведена схема блока из двух генераторов, часто используемая на гидроэлектростанциях.

В схемах блоков емкостный ток замыкания на землю, а следовательно и ток дугогасящих реакторов, по сравнению с аналогичными параметрами в распределительных электрических сетях, невелики, как правило, не превышает 10...15 А. Для таких условий предлагаемое в статье решение по увеличению контрольного тока является наиболее эффективным.

Для обеспечения действия защиты генераторов при устойчивых замыканиях на землю в цепь дугогасящих реакторов со стороны заземления включается специальный источник с частотой 25 Гц, называемый источником контрольного тока (ИКТ) [1, 2]. Защита от замыканий на землю, основанная на наложении тока с частотой 25 Гц, в течение длительного времени успешно используется на энергетических предприятиях.

Надежность работы защиты при прочих равных условиях тем выше, чем больший контрольный ток может быть обеспечен при замыкании на землю. Возможность увеличения контрольного тока за счет увеличения габаритов источника ограничена условиями компоновки электроустановки, а также и его стоимостью, которая должна составлять лишь небольшую долю от стоимости основного оборудования.

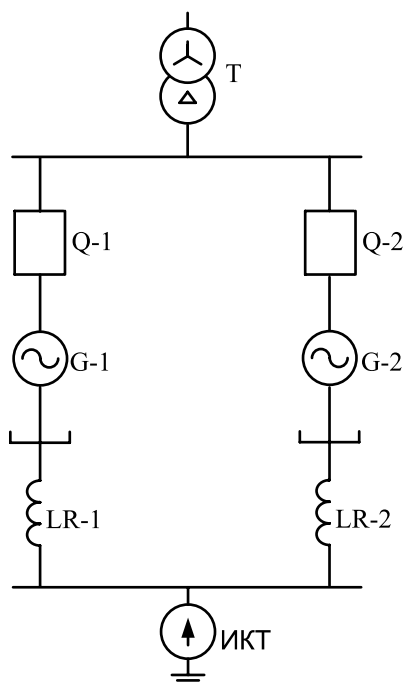


Рис. 1. Схема энергоблока с параллельно включенными генераторами G-1 и G-2

В связи с этим в данной работе предлагается изменение внутренней схемы ИКТ, позволяющее увеличить контрольный ток, отбираемый от источника, без увеличения его габаритов и расхода активных материалов.

Схема ИКТ приведена на рис. 2. Основой источника контрольного тока является электромагнитный параметрический делитель частоты, впервые предложенный в [3]. Электромагнитная часть делителя частоты выполнена на двух одинаковых замкнутых О-образных магнитопроводах, у которых боковые стержни конструктивно совмещены. На магнитопроводах делителя частоты нанесены следующие обмотки: обмотка колебательного контура ( $W_k$ ), выходная ( $W$ ) и обмотка возбуждения ( $W_B$ ), в цепь последней включен диод. На обмотку возбуждения подается напряжение питания с частотой 50 Гц.

Основным фактором, который ограничивает максимально возможное значение контрольного тока, является влияние намагничивающей силы от

тока дугогасящих реакторов, протекающего по выходной обмотке при замыкании на землю.

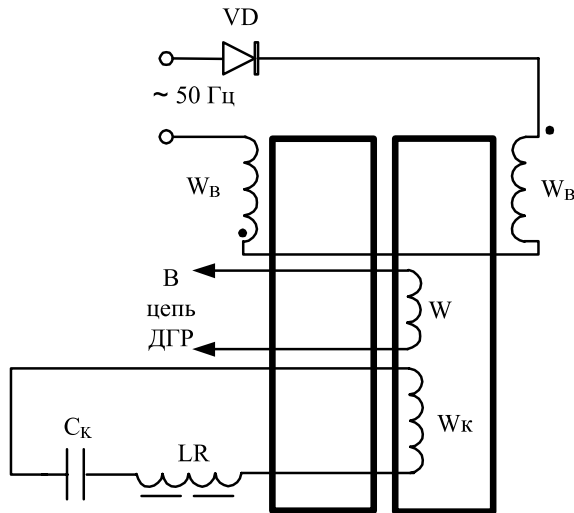


Рис. 2. Принципиальная схема источника контрольного тока

Для снижения этого влияния применяется компенсация на промышленной частоте (50 Гц) емкостного сопротивления конденсатора колебательного контура последовательно включенным линейным дросселем [1, 4]. Емкость конденсатора и индуктивность дросселя выбираются таким образом, чтобы эквивалентное емкостное сопротивление на частоте 25 Гц удовлетворяло условиям существования режима деления частоты.

Между выходной обмоткой и обмоткой колебательного контура имеет место трансформаторная связь, поэтому для анализа влияния тока дугогасящих реакторов на процессы в делителе частоты используется схема, приведенная на рис. 3.

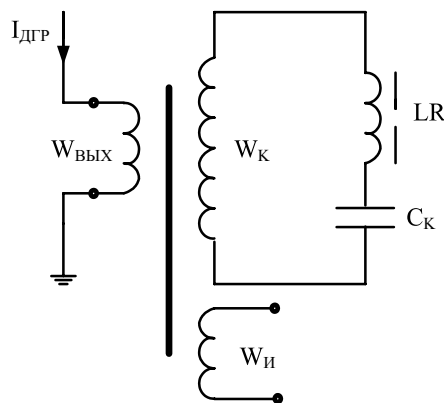


Рис. 3. Схема делителя частоты относительно зажимов выходной обмотки

Схема замещения для электрических величин с частотой 50 Гц, соответствующая исходной схеме по рис. 3, при точной настройке в резонанс цепи дроссель – конденсатор с учетом индуктивности рассеивания обмотки колебательного контура приведена на рис. 4.

На схеме рис. 4  $X_{\mu 50}$  – эквивалентное сопротивление ветви намагничивания к току с частотой

50 Гц, приведенное к числу витков обмотки колебательного контура,  $R_K$  и  $R_{ДР}$  – соответственно активное сопротивление обмотки колебательного контура и обмотки дросселя.

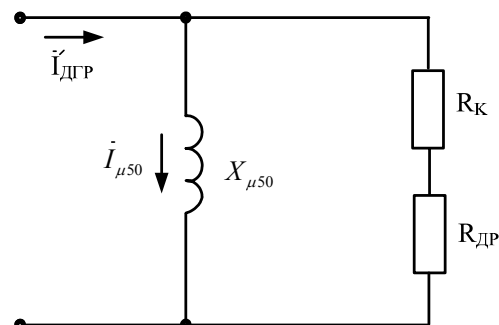


Рис. 4. Схема замещения делителя частоты относительно зажимов выходной обмотки

Ток дугогасящих реакторов также приведен к числу витков колебательного контура и равен

$$I'_{ДГР} = \frac{W_{ВЫХ}}{W_K} I_{ДГР},$$

где  $W_{ВЫХ}$  и  $W_K$  число витков выходной обмотки и колебательного контура.

На электромагнитные процессы в делителе частоты оказывает влияние только намагничивающая часть тока  $I_{\mu 50}$ , абсолютная величина которого равна

$$I_{\mu 50} = I_{ДГР} \frac{W_{ВЫХ} R_{КЭКВ}}{W_K \sqrt{R_{КЭКВ}^2 + X_{\mu 50}^2}},$$

где  $R_{КЭКВ} = R_K + R_{ДР}$  – эквивалентное активное сопротивление цепи колебательного контура.

При настройке и периодической проверке источника контрольного тока степень влияния тока  $I_{ДГР}$  оценивается по напряжению с частотой 50 Гц на ветви намагничивания. Практически это напряжение измеряется на специальной измерительной обмотке с числом витков  $W_{И}$  и равно

$$U_{\mu 50} = I_{ДГР} \frac{W_{ВЫХ} W_{И} X_{\mu 50} R_{КЭКВ}}{W_K^2 \sqrt{R_{КЭКВ}^2 + X_{\mu 50}^2}}. \quad (1)$$

Фактические параметры ИКТ таковы, что  $R_{КЭКВ} \ll X_{\mu 50}$ , поэтому выражение (1) можно упростить

$$U_{\mu 50} = I_{ДГР} \frac{W_{ВЫХ} W_{И} R_{КЭКВ}}{W_K^2}.$$

При пропускании по выходной обмотке тока, равного суммарному току дугогасящих реакторов, напряжение на измерительной обмотке не должно превышать некоторого допустимого значения для данной конструкции делителя частоты.

$$U_{\mu 50} \leq U_{ДОП}. \quad (2)$$

Число витков выходной обмотки определяется требуемым значением контрольного тока  $I_{25}$  и эк-

вивалентным сопротивлением дугогасящих реакторов на частоте 25 Гц  $X_{25}$ :

$$W_{\text{ВЫХ}} = \frac{I_{25} X_{25}}{U_{\text{УД}}},$$

где  $U_{\text{УД}}$  – напряжение с частотой 25 Гц на 1 виток для конкретного исполнения ИКТ.

Выразим  $X_{25}$  через суммарный ток дугогасящих реакторов и номинальное напряжение электроустановки  $U_{\text{НОМ}}$ :

$$X_{25} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{2\sqrt{3}I_{\text{ДГР}}},$$

Таким образом, требуемое число витков выходной обмотки будет равно

$$W_{\text{ВЫХ}} = \frac{I_{25} U_{\text{НОМ}}}{2\sqrt{3}I_{\text{ДГР}}U_{\text{УД}}}. \quad (3)$$

С учетом (3) напряжение с частотой 50 Гц на измерительной обмотке

$$U_{\mu 50} = \frac{I_{25} U_{\text{НОМ}} W_{\text{И}} R_{\text{ЭКВ}}}{2\sqrt{3}U_{\text{УД}} W_{\text{К}}^2}.$$

Из условия (2) можно определить максимально допустимое значение эквивалентного активного сопротивления цепи колебательного контура, при котором возможно обеспечение заданного контрольного тока  $I_{25}$

$$R_{\text{ДОП}} = \frac{2\sqrt{3}U_{\text{УД}}U_{\text{ДОП}}W_{\text{К}}^2}{I_{25}U_{\text{НОМ}}W_{\text{И}}}. \quad (4)$$

Из (4) также следует, что контрольный ток  $I_{25}$  может быть увеличен во столько же раз, во сколько раз можно будет снизить активное сопротивление цепи колебательного контура.

Сопротивление контурной обмотки определяется площадью окна магнитопровода, где эта обмотка может быть размещена, и коэффициентом заполнения окна медью. В окне магнитопровода делителя частоты размещаются обмотки: питания (возбуждения), колебательного контура, выходная и измерительная. Площадь поперечного сечения провода и число витков обмотки возбуждения и измерительной обмотки не зависят от контрольного тока и тока дугогасящих реакторов, поэтому площадь окна, занимаемая этими обмотками, как постоянная величина, сразу же вычитается из общей площади окна магнитопровода. Площадь окна, которая может быть занята обмоткой колебательного контура и выходной обмоткой, обозначим  $S_{\text{О}}$ .

Для того, чтобы получить выражение для активного сопротивления обмотки колебательного контура, используем приводимые ниже соотношения.

Площадь поперечного сечения провода выходной обмотки определим по плотности тока  $\Delta_{\text{В}}$ :

$$S_{\text{ПР.В}} = \frac{I_{\text{ДГР}}}{\Delta_{\text{В}}}. \quad (5)$$

Площадь окна, занимаемая выходной обмоткой:

$$S_{\text{ОВ}} = \frac{S_{\text{ПР.В}}W_{\text{В}}}{K_{3.В}}. \quad (6)$$

Площадь окна, которая может быть занята обмоткой колебательного контура:

$$S_{\text{ОК}} = S_{\text{О}} - S_{\text{ОВ}}. \quad (7)$$

Площадь поперечного сечения провода контурной обмотки:

$$S_{\text{ПР.К}} = \frac{S_{\text{ОК}}K_{3.К}}{W_{\text{К}}}. \quad (8)$$

В формулах (6) и (8)  $K_{3.В}$  и  $K_{3.К}$  – соответственно коэффициенты заполнения окна медью выходной обмотки и обмотки колебательного контура.

Активное сопротивление обмотки колебательного контура может быть определено как:

$$R_{\text{К}} = \frac{W_{\text{К}}^2 l_{\text{БК}} \rho}{S_{\text{ПР.К}}},$$

где  $l_{\text{БК}}$  – средняя длина витка обмотки колебательного контура,  $\rho$  – удельное сопротивление материала провода.

С учетом (7) и (8) получим

$$R_{\text{К}} = \frac{W_{\text{К}}^2 l_{\text{БК}} \rho}{(S_{\text{О}} - S_{\text{ОВ}})K_{3.К}}. \quad (9)$$

Число витков выходной обмотки в (6) должно быть определено по (3), а число витков обмотки колебательного контура в (8) известно, т. к. определяется условиями обеспечения электромагнитного режима деления частоты и от варьируемых далее параметров не зависит.

Подставляя (6) и (3) в (9) получим

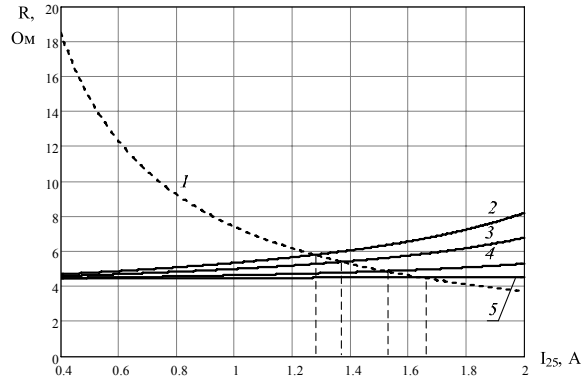
$$R_{\text{К}} = \frac{W_{\text{К}}^2 l_{\text{БК}} \rho}{\left( S_{\text{О}} - \frac{I_{25} U_{\text{НОМ}}}{2\sqrt{3}U_{\text{УД}} \Delta_{\text{В}} K_{3.В}} \right) K_{3.К}}. \quad (10)$$

Как видно из (10) расчетное активное сопротивление обмотки колебательного контура при прочих равных условиях увеличивается с ростом тока с частотой 25 Гц, отбираемого от источника контрольного тока, т. к. при этом уменьшается площадь окна магнитопровода, которая может быть занята этой обмоткой. Увеличивать отбираемый контрольный ток можно лишь до тех пор, пока эквивалентное сопротивление цепи колебательного контура, равное сумме сопротивлений собственно обмотки  $R_{\text{К}}$  и дросселя  $R_{\text{ДР}}$  не достигнет значения  $R_{\text{ДОП}}$  по (4).

Далее проводим расчеты для конкретного исполнения ИКТ со следующими значениями конструктивных и электрических параметров:  $S_{\text{О}}=14400 \text{ мм}^2$ ;  $l_{\text{БК}}=0,68 \text{ м}$ ;  $l_{\text{ВВ}}=0,75 \text{ м}$ ;  $K_{3.К}=0,3$ ;  $K_{3.В}=0,3$ ;  $\Delta_{\text{В}}=2 \text{ А/мм}^2$ ;  $\rho=0,0175 \text{ Ом}\cdot\text{м/мм}^2$ ;  $U_{\text{НОМ}}=10 \text{ кВ}$ ;  $U_{\text{УД}}=1 \text{ В}$ ;  $W_{\text{К}}=830$ ;  $R_{\text{ДР}}=2,5 \text{ Ом}$ .

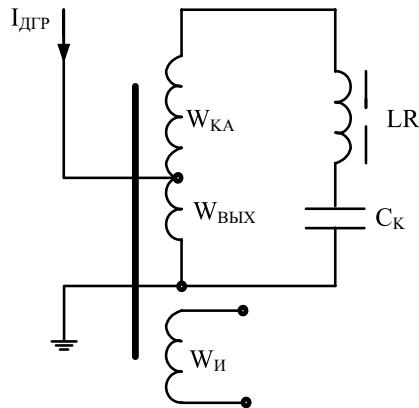
Зависимости  $R_{\text{ЭКВ}}$  и  $R_{\text{ДОП}}$  от  $I_{25}$  приведены на рис. 5. Точка пересечения кривых 1 и 2 дает значе-

ние максимально возможного тока для некоторой определенной конструкции делителя частоты при ограничении по площади окна магнитопровода, которая может быть занята обмоткой колебательного контура и выходной обмоткой. В данном случае расчетное значение максимально возможного тока по условию  $R_K = R_{\text{доп}}$  составляет 1,28 А.



**Рис. 5.** К определению максимально возможного контрольного тока: 1) максимально допустимое сопротивление; 2) фактическое сопротивление при трансформаторной связи и 3–5) при автотрансформаторной связи и при токах  $I_{\text{дгр}}$  соответственно 50, 20 и 10 А

Для возможного увеличения максимально допустимого для данной конструкции делителя частоты контрольного тока предлагается замена трансформаторной связи между обмоткой колебательного контура и выходной обмоткой на автотрансформаторную, рис. 6.



**Рис. 6.** Схема делителя частоты при автотрансформаторном соединении выходной и контурной обмоток

При этом за счет замещения части витков обмотки колебательного контура выходной обмоткой оставшаяся часть витков  $W_{\text{кА}} = W_{\text{к}} - W_{\text{в}}$  может быть выполнена проводом с большей площадью поперечного сечения. Так как площадь поперечного сечения провода выходной обмотки, как правило, не меньше площади поперечного сечения обмотки колебательного контура, то можно ожидать, что активное сопротивление цепи колебательного контура уменьшится.

Оценим возможное увеличение максимального контрольного тока при замене трансформаторной связи на автотрансформаторную.

Активное сопротивление цепи контурной обмотки при автотрансформаторной связи

$$R_K = R_{\text{кА}} + R_{\text{в}} + R_{\text{дгр}},$$

где  $R_{\text{кА}}$  и  $R_{\text{в}}$  — соответственно активные сопротивления части обмотки с числом витков  $W_{\text{кА}}$  и выходной обмотки.

Число витков части контурной обмотки  $W_{\text{кА}}$  из условия сохранения электромагнитного режима делителя частоты должно быть равно

$$W_{\text{кА}} = W_{\text{к}} - W_{\text{в}}. \quad (11)$$

Площадь окна магнитопровода для размещения части контурной обмотки с числом витков  $W_{\text{кА}}$ :

$$S_{\text{оКА}} = S_{\text{о}} - S_{\text{ов}}. \quad (12)$$

Активное сопротивление этой части обмотки с учетом (11), (12), (3), (5) и (6) равно

$$R_{\text{кА}} = \frac{\left( W_{\text{к}} - \frac{I_{25} U_{\text{НОМ}}}{2\sqrt{3} U_{\text{УД}} I_{\text{дгр}}} \right)^2 l_{\text{вк}} \rho}{\left( S_{\text{о}} - \frac{I_{25} U_{\text{НОМ}}}{2\sqrt{3} U_{\text{УД}} K_{3\text{В}} \Delta_{\text{В}}} \right) K_{3\text{К}}}. \quad (13)$$

По (13) важно отметить, что эффект снижения сопротивления тем выше, чем меньше ток дугогасящих реакторов. Для окончательного вывода о возможном эффекте от замены трансформаторной связи на автотрансформаторную необходимо учесть сопротивление выходной обмотки, которое равно

$$R_{\text{вых}} = \frac{W_{\text{в}} l_{\text{вв}} \rho}{S_{\text{прв}}}, \quad (14)$$

где  $l_{\text{вв}}$  — средняя длина витка выходной обмотки.

Подставим (3) и (5) в (14)

$$R_{\text{вых}} = \frac{I_{25} U_{\text{НОМ}} l_{\text{вв}} \rho \Delta_{\text{В}}}{2\sqrt{3} U_{\text{УД}} (I_{\text{дгр}})^2}. \quad (15)$$

Сопротивление дросселя остается таким же, как и в расчете сопротивления цепи контурной обмотки при трансформаторной связи обмоток.

На рис. 5 сопоставлены зависимости максимально допустимого активного сопротивления цепи колебательного контура от значения тока  $I_{25}$  и фактического расчетного сопротивления при автотрансформаторной связи при различных значениях тока дугогасящих реакторов  $I_{\text{дгр}}$ .

Как видно из рис. 5, использование автотрансформаторной связи позволяет увеличить максимально возможное значение контрольного тока. Этот эффект проявляется тем лучше, чем меньше ток дугогасящих реакторов. Это объясняется тем, что число витков, замещаемых за счет выходной обмотки, обратно пропорционально току дугогасящих реакторов. Хотя, как видно из (15), одновременно быстро растет активное сопротивление выходной обмотки (обратно пропорционально квадрату тока дугогасящих реакторов), активное сопротивление цепи контурной обмотки уменьшает-

ся. Так, при токах дугогасящих реакторов соответственно 50, 20 и 10 А, максимальный контрольный ток при автотрансформаторной связи составляет соответственно 1,37, 1,51 и 1,64 А, в то время как при трансформаторной связи 1,28 А.

Увеличение контрольного тока достигается без увеличения расхода трансформаторной стали и меди, т. к., *во-первых*, не меняются размеры магнитопровода, а, *во-вторых*, сечение проводов выбирается из условия заполнения неизменной площади ок-

на магнитопровода с практически одинаковыми коэффициентами заполнения.

Возможность увеличения контрольного тока именно при сравнительно небольших значениях тока дугогасящих реакторов имеет большое практическое значение для повышения надежности работы защиты от замыканий на землю в обмотке статора гидрогенераторов, работающих в укрупненном блоке на одну обмотку низкого напряжения повышающего трансформатора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2268524 РФ. МПК<sup>7</sup> H02H 3/16. Устройство для защиты от замыканий в сетях с компенсацией емкостного тока / Р.А. Вайнштейн, В.В. Шестакова, С.М. Юдин. Приор. 17.08.2004; Опубл. 20.01.2006, Бюл. № 2.
2. Пат. 2286637 РФ. МПК<sup>7</sup> H02H 7/06. Устройство для селективной защиты на землю в обмотке статора генераторов, работающих в укрупненном блоке / Р.А. Вайнштейн, А.М. Наумов, В.В. Шестакова, С.М. Юдин. Приор. 29.07.2005, Опубл. 27.10.2006 Бюл. № 30.
3. Мандельштам Л.И., Папалекси Н.Д. Собрание сочинений Мандельштама Л.И. – Т. 2. – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – 325 с.
4. Вайнштейн Р.А., Гетманов В.Т., Пушков А.П. и др. Стопроцентная защита от замыканий на землю обмотки статора гидрогенераторов Красноярской ГЭС // Электрические станции. – 1972. – № 2. – С. 41–44.

Поступила 04.05.2008 г.

УДК 621.311.016.001.24

## РАСЧЕТ РЕЖИМОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ И ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ, СОДЕРЖАЩИХ ВЕТВИ С ЭДС

С.Г. Слюсаренко, Л.Ю. Костюк

Томский политехнический университет

E-mail: ssg@tpu.ru

*Предлагается универсальный алгоритм расчета токов трехфазного короткого замыкания на основе итерационного преобразования электрических схем без приведения параметров к базисным условиям и с сохранением энергетического баланса для исходных и эквивалентных моделей.*

#### Введение

В электроэнергетике расчеты режимов электрических схем методом преобразования широко применяются при моделировании коротких замыканий (КЗ). Преобразования выполняются на расчетных схемах, у которых параметры узлов и ветвей приведены к одним базисным условиям. Последовательное упрощение схем осуществляется путем эквивалентирования последовательно и параллельно соединенных ветвей, преобразований соединений ветвей в треугольник в соединение звездой и т. д. Формализация такой процедуры требует разработки и реализации сложных алгоритмов топологического анализа графов и выбора наилучшей траектории их преобразования. Главным недостатком таких преобразований является то, что в общем случае мощности источников и приемников энергии в исходной схеме не равны соответствующим мощностям в эквивалентной схеме [1].

В данной статье предлагается универсальный алгоритм расчета токов трехфазного КЗ на основе

итерационного преобразования электрических схем без приведения параметров к базисным условиям с сохранением энергетического баланса для исходных и эквивалентных моделей. Последнее обеспечивается расчетом режима линейной электрической схемы. Показан пример реализации одной итерации для решения обозначенной задачи на простой электрической схеме. Детали ключевых позиций алгоритма поясняются на примере обобщенного узла расчетной схемы.

#### Формирование информационного базиса для моделирования трехфазного короткого замыкания

Под информационным базисом подразумеваются сведения, необходимые для решения поставленной задачи. К их числу относятся графическая и параметрическая модели электрической системы, позволяющие рассчитать исходный установившийся режим. По его параметрам формируются сверхпереходные эквиваленты с сопротивлениями и источниками ЭДС для синхронных и асинхрон-