

- трии магнитного поля рассеивания и путем измерения специализированным датчиком степени нарушения поля рассеивания от поврежденного полюса относительно неповрежденного полюса можно диагностировать витковое замыкание.
- Преобразование ЭДС на выходе индукционно-датчика в однополярный сигнал с последую-

- щим выделением субгармонической частоты, равной частоте вращения ротора, позволяет определить замыкание витков обмотки ротора.
- В результате проведенных экспериментов было выявлено, что разработанное устройство способно надежно определять замыкание 4 % витков обмотки ротора синхронного генератора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Самородов Ю.Н. Турбогенераторы. Аварии и инциденты. – М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008. – 488 с.
- Глебов И.А., Данилевич Я.Б. Диагностика турбогенераторов. – Л.: Наука, 1989. – 119 с.
- Алексеев А.Е., Костенко М.П. Турбогенераторы. – М.: Госэнергоиздат, 1939. – 341 с.
- Wood J.W., Hindmarch R.T. Rotor winding short detection // IEEE Proceedings. – 1986. – V. 133. – № 8. – P. 181–189.
- Способ диагностики и контроля витковых замыканий в роторе синхронной машины: пат. 2192649 Рос. Федерация. № 2000129947/09; заявл. 30.11.2000; опубл. 10.11.2002, Бюл. № 5. – 4 с.

Поступила 17.09.2012 г.

УДК 621.316.925

## ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ЗАЩИТЫ ОБМОТКИ СТАТОРА ГЕНЕРАТОРА ОТ ЗАМКНИЙ НА ЗЕМЛЮ С НАЛОЖЕНИЕМ КОНТРОЛЬНОГО ТОКА ЧЕРЕЗ ТРАНСФОРМАТОР НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПЕРЕМЕЖАЮЩИХСЯ ЗАМКНИЙ

А.В. Доронин

ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары

E-mail: doronin\_av@ekra.ru

*Рассматриваются условия функционирования защиты от замыканий на землю в обмотке статора генераторов, выполненной на принципе наложения контрольного тока с частотой, отличающейся от промышленной, при дугowych перемежающихся замыканиях. Вскрыт механизм формирования составляющей с частотой контрольного тока в токе замыкания, выявлены основные факторы, от которых зависит значение этой составляющей, и дана количественная оценка влияния этих факторов.*

#### Ключевые слова:

*Защита от замыканий на землю, обмотка статора генератора, устойчивые и перемежающиеся дугowe замыкания.*

#### Key words:

*Earth fault protection, stator winding of the generator, stable and intermittent arc faults.*

В настоящее время к защите от замыканий на землю в обмотке статора генераторов предъявляется определенный набор требований, главным из которых является отсутствие зоны нечувствительности при замыкании вблизи нейтрали, работоспособность как при устойчивых, так и при дугowych перемежающихся замыканиях. Для случаев, когда генератор имеет гальваническую связь с другими генераторами или с внешней сетью к защите также предъявляется требование избирательности.

Одним из таких случаев является довольно широко применяемая в последнее время схема блока генератор-трансформатор с питанием потребителей собственных нужд или потребителей некоторой внешней сети через реактированную отпайку [1]. Суммарный емкостный ток замыкания на землю присоединенной к реактору сети, как правило, составляет 5...10 А, и сеть работает с изолированной нейтралью.

Для защиты от замыканий на землю в обмотке статора генератора в таких блоках в ООО НПП «ЭКРА» разработана и применена на нескольких электростанциях защита, основанная на наложении на первичные цепи контрольного тока с частотой 25 Гц через вторичные обмотки типового трансформатора напряжения, соединенные в разомкнутый треугольник [2]. Причем в разомкнутый треугольник соединяются основные вторичные обмотки, т. к. это позволяет при прочих равных условиях получить больший контрольный ток. Схема включения элементов защиты приведена на рис. 1.

Генератор контрольного тока (ГКТ) включается в цепь разомкнутого треугольника трансформатора напряжения TV1 через фильтр присоединения, состоящий из последовательно соединенных линейного дросселя и конденсатора, настроенных в резонанс на частоте 25 Гц.

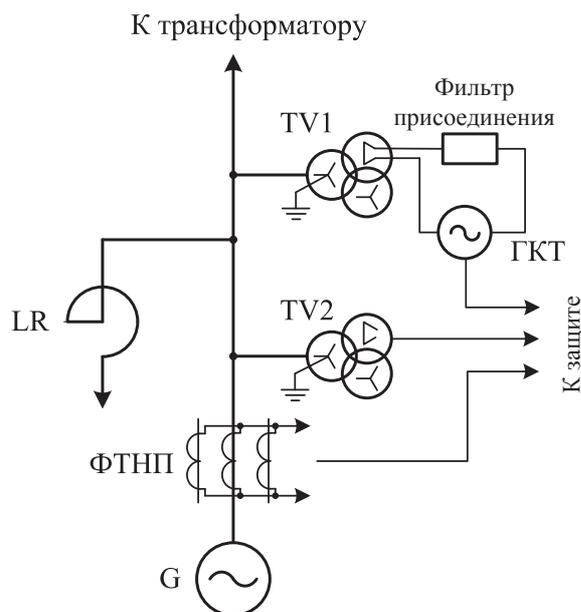


Рис. 1. Схема включения элементов защиты обмотки статора генератора от замыканий на землю в схеме блока с реактированной отпайкой

Напряжение ГКТ и значения индуктивности дросселя и емкости конденсатора фильтра выбраны так, что при металлическом замыкании на землю токи в обмотках трансформатора не превышают допустимых значений, соответствующих максимальной мощности трансформаторов напряжения (в данном случае ЗНОЛ.09-6). Составляющая тока с частотой 25 Гц в месте замыкания равна 0,32 А.

Электрические величины с частотой 25 Гц при устойчивом замыкании через переходное сопротивление могут быть определены по схеме замещения нулевой последовательности, в которой напряжение ГКТ  $U_{25}$ , параметры элементов фильтра присоединения  $L_{\text{пр}}$ ,  $C_{\text{пр}}$  и  $R_{\text{пр}}$  приведены к ступени высокого напряжения (рис. 2).

Емкость трех фаз обмотки статора генератора, трех фаз сети, присоединенной к реактору, и переходное сопротивление в месте замыкания обозначены на рис. 2 соответственно  $C_{\Gamma}$ ,  $C_{\text{P}}$  и  $R_{\text{з}}$ .

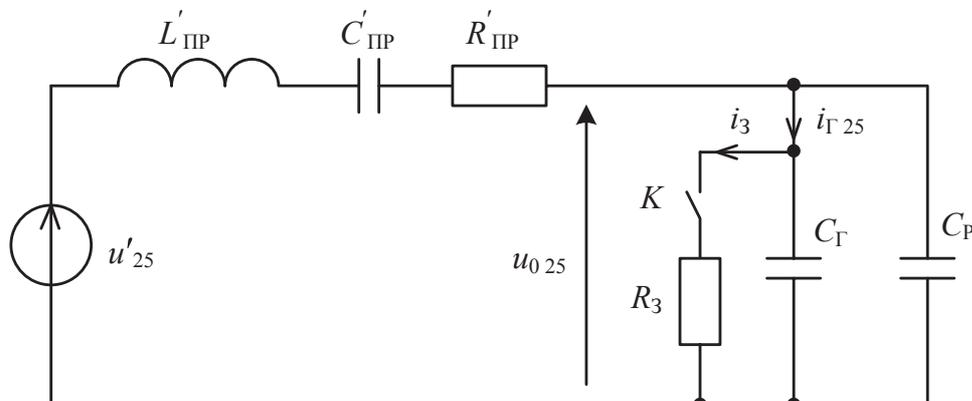


Рис. 2. Схема замещения нулевой последовательности для определения электрических величин с частотой 25 Гц при замыкании в обмотке статора генератора

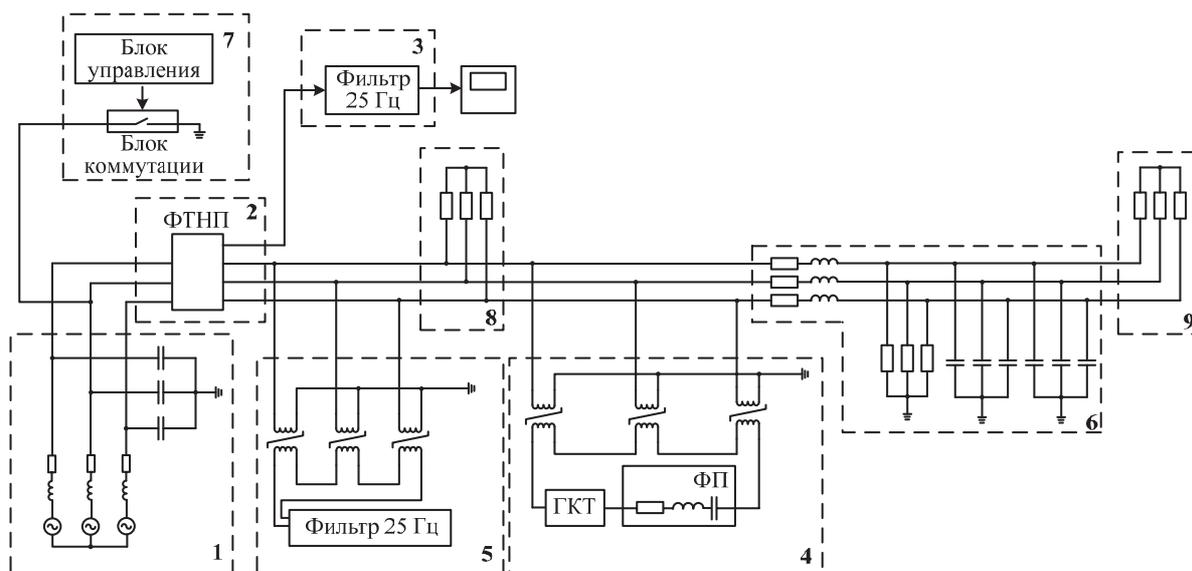
Принцип действия защиты при устойчивом замыкании очевиден: при замыкании на землю в обмотке статора генератора доля тока с частотой 25 Гц ( $i_{\Gamma 25}$ ), отходящая в цепь генератора, увеличивается, а составляющая с частотой 25 Гц в напряжении нулевой последовательности ( $u_{025}$ ) уменьшается. Это позволяет выполнить защиту, реагирующую на сопротивление или проводимость в месте замыкания, формируемые как отношения упомянутых электрических величин.

Поскольку емкостные сопротивления фаз относительно земли намного больше продольных сопротивлений фаз генератора, то характер изменения электрических величин не зависит от места замыкания и поэтому защита не имеет зоны нечувствительности.

Моделирование процессов на базе программного пакета Matlab при перемежающихся замыканиях в схеме замещения блока, рис. 3, показало, что и при перемежающихся замыканиях в токе замыкания появляется составляющая с частотой 25 Гц, в том числе и при наибольшем отличии процессов от процессов при устойчивом замыкании, а именно, когда имеет место одна пробой изоляции на каждом полупериоде напряжения промышленной частоты и дуга гаснет при переходе через ноль переходной высокочастотной составляющей тока в месте замыкания.

При проведении расчетных исследований использована модель, имитирующая дуговые перемежающиеся замыкания и описанная в [3]. Она позволяет моделировать дуговое замыкание при различных пробивных напряжениях и различных моментах погасания дуги.

Элементы электрической сети и элементы устройства наложения контрольного тока имеют линейные вольтамперные характеристики, поэтому закономерности формирования электрических величин с частотой 25 Гц не только при устойчивых, но и при перемежающихся замыканиях можно определить без учета действия рабочего напряжения, поскольку они порождаются в данном случае только напряжением ГКТ и выделяются, *вопреки*, фильтром нулевой последовательности, а,



**Рис. 3.** Схема модели энергоблока и элементов защиты: 1) генератор; 2) фильтр токов нулевой последовательности (ФТНП); 3) фильтр низкой частоты для выделения низкочастотных составляющих тока нулевой последовательности в цепи генератора; 4) трансформатор напряжения нулевой последовательности с генератором контрольного тока и фильтром присоединения; 5) сетевой фильтр напряжения нулевой последовательности с частотным фильтром для выделения низкочастотных составляющих; 6) модель сети, присоединенной через реактор; 7) модель перемежающегося дугового замыкания; 8, 9) сопротивление нагрузки, подключенной к генератору и к реактору

во-вторых, частотными фильтрами измерительного органа защиты. Таким условиям соответствует схема замещения нулевой последовательности по рис. 2, в которой место замыкания может быть представлено идеальным ключом  $K$ , замыкающимся при каждом пробое изоляции на время, равное полупериоду переходного ёмкостного тока, которое лежит в пределах  $0,1 \dots 0,5$  мс.

Упрощенное объяснение механизма формирования составляющей с частотой 25 Гц при перемежающихся замыканиях, когда дуга горит в течение очень малого времени по сравнению с периодом контрольного тока, приведено в [2] и заключается в том, что цепь, через которую разряжается емкость сети  $C_p$  при зажигании дуги (замыкание ключа  $K$  в схеме рис. 2), имеет такую постоянную времени, что даже при очень малом времени горения дуги емкость  $C_p$ , заряженная до некоторого напряжения  $u_i$ , успевает практически полностью разрядиться, и вся энергия, запасенная к моменту пробоя, передается в контур цепи замыкания. В токе замыкания при этом появляется последовательность импульсов тока большой амплитуды, содержащая составляющую с частотой 25 Гц.

Графики, поясняющие описанный механизм, приведены на рис. 4 для случая, когда на каждом полупериоде напряжения промышленной частоты происходит один пробой изоляции.

Для разработки защиты и последующего выбора параметров её настройки необходима количественная оценка тока с частотой 25 Гц в цепи замыкания, а также выявление факторов, влияющих на его значение при дуговых перемежающихся замыканиях.

Амплитуда гармонической составляющей с частотой 25 Гц в токе замыкания определяется разло-

жением последовательности импульсов тока  $i_3$  в ряд Фурье.

$$I_{25S} = \sqrt{I_{25S}^2 + I_{25C}^2},$$

$$I_{25S} = \sum_{i=2}^{i=n} \frac{2}{T} \int_0^{t_d} i_{3i}(t) \cdot \sin \omega(t_i + t) dt, \quad (1)$$

$$I_{25C} = \sum_{i=2}^{i=n} \frac{2}{T} \int_0^{t_d} i_{3i}(t) \cdot \cos \omega(t_i + t) dt, \quad (2)$$

где  $I_{25S}$  и  $I_{25C}$  – амплитуда синусной и косинусной составляющих в токе замыкания;  $T$  и  $\omega$  – соответственно период и угловая частота составляющей 25 Гц в токе замыкания;  $t_i$  – время от момента перехода через ноль напряжения ГКТ до момента очередного пробоя изоляции;  $t_d$  – время горения дуги (замкнутого состояния ключа  $K$ );  $n$  – число пробоев изоляции за полупериод напряжения ГКТ ( $n=2$  – минимальное число пробоев);  $i_{3i}(t)$  – мгновенное значение тока в месте замыкания при  $i$ -м пробое изоляции.

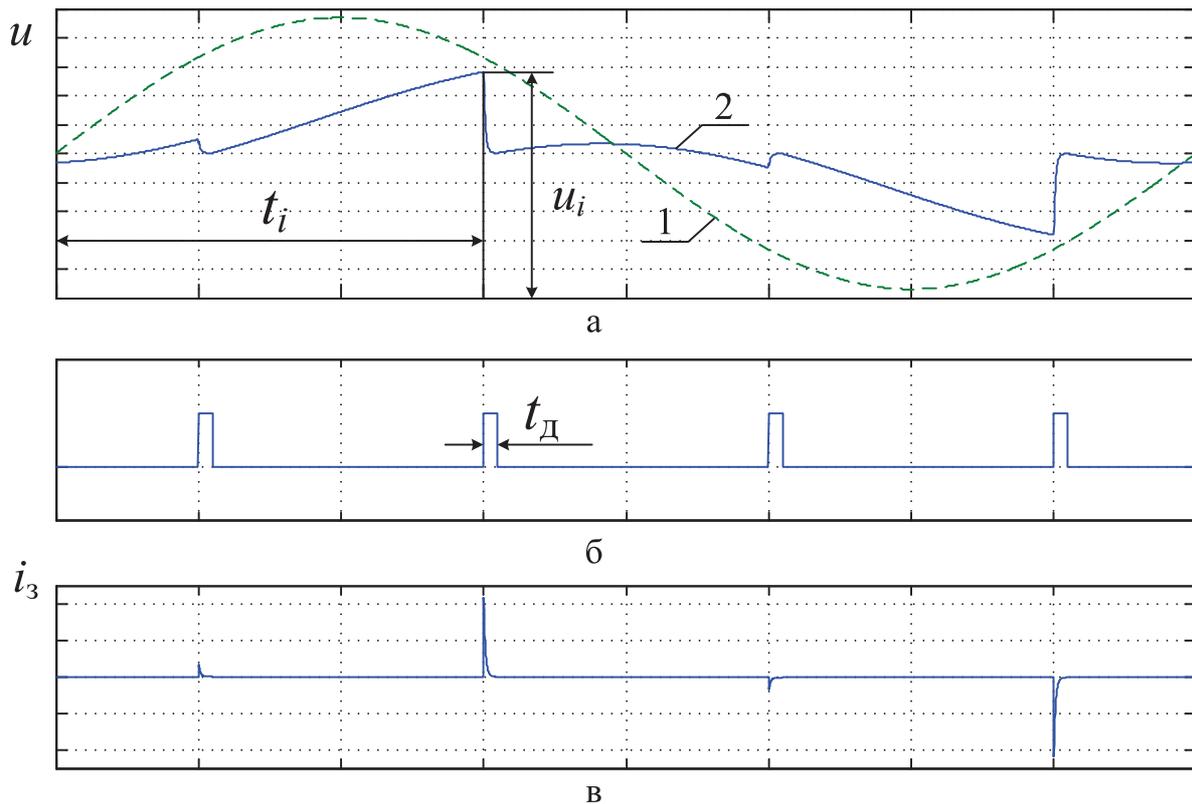
Пределы интегрирования после каждого пробоя изоляции приняты от нуля до  $t_d$ , поскольку только в этот промежуток времени ток  $i_3$  практически не равен нулю.

Так как  $t_d \ll T$ , то можно считать, что за время  $t_d$  функции в (1) и (2) практически не изменяются и принять  $\sin \omega(t_i + t_n) \approx \sin \omega t_i$ ;  $\cos \omega(t_i + t_n) \approx \cos \omega t_i$

С учетом этого обстоятельства

$$I_{25S} = \frac{2}{T} \sum_{i=2}^{i=n} \sin \omega t_i \int_0^{t_d} i_{3i}(t) dt,$$

$$I_{25C} = \frac{2}{T} \sum_{i=2}^{i=n} \cos \omega t_i \int_0^{t_d} i_{3i}(t) dt.$$



**Рис. 4.** Пояснение к механизму формирования тока с частотой 25 Гц в цепи замыкания при перемежающемся замыкании: а) напряжение ГКТ (кривая 1) и напряжение на емкости  $C_p$  (кривая 2); б) импульсы замыкания ключа  $K$ ; в) ток в месте замыкания

Учтем далее, что, *во-первых*, ток  $i_3(t) = (C_p + C_r) \frac{du_p}{dt}$  и, *во-вторых*, что при каждом пробое изоляции напряжение  $u_p$  за время  $t_d$  изменяется от  $u_i$  до нуля. Поэтому

$$\int_0^{t_d} i_{3i} dt = (C_p + C_r) u_i.$$

Теперь окончательно получим

$$I_{25S} = \frac{2}{T} (C_p + C_r) \sum_{i=2}^{i=n} u_i \cdot \sin \omega t_i, \quad (3)$$

$$I_{25C} = \frac{2}{T} (C_p + C_r) \sum_{i=2}^{i=n} u_i \cdot \cos \omega t_i. \quad (4)$$

Из соотношений (3) и (4) можно установить, от каких факторов зависит амплитуда тока с частотой 25 Гц. Однако нельзя рассматривать эти факторы в отдельности, поскольку они определенным образом связаны между собой.

Достаточно очевидно следующее:

1. При изменении емкости  $C_p$  одновременно изменяется постоянная времени её заряда, поэтому при прочих равных условиях увеличение емкости приведет к снижению  $u_i$  и наоборот. Кроме этого, при увеличении ёмкости увеличивается постоянная времени её разряда при замыкании и поэтому эта ёмкость может не полностью разрядиться за время горения дуги.

2. Увеличение числа пробоев за полупериод  $T/2$  приводит к увеличению числа составляющих под знаком суммы, но одновременно и к снижению  $u_i$  из-за уменьшения времени между соседними пробоями изоляции.

3. Изменение фазы моментов пробоя изоляции относительно напряжения ГКТ приводит к изменению синусной и косинусной составляющей тока в противоположных направлениях. Если одна из них увеличивается, то другая уменьшается.

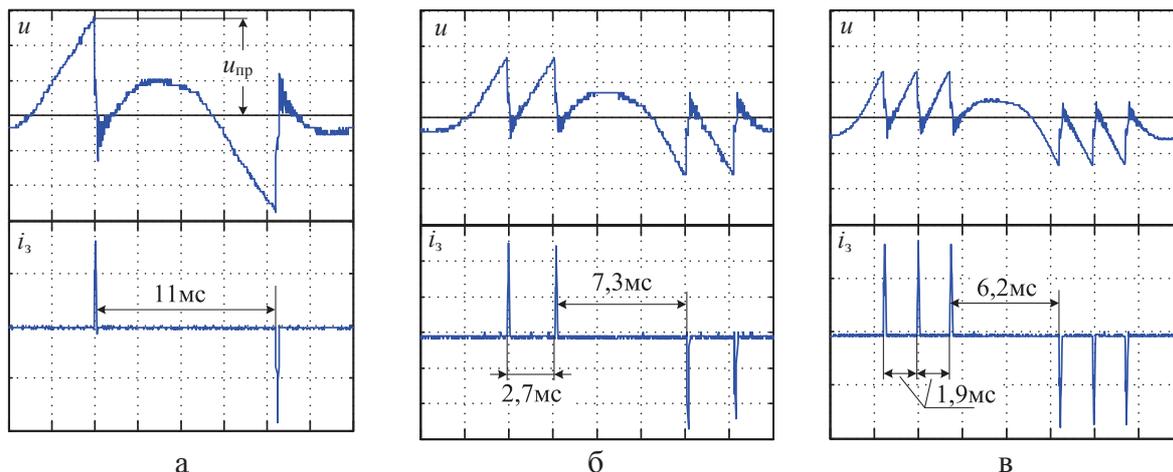
Из приведенного качественного анализа можно ожидать, что взаимное влияние различных факторов будет оказывать стабилизирующее влияние на значение тока с частотой 25 Гц при перемежающихся замыканиях.

Далее приведены результаты исследований влияния перечисленных выше факторов на базе программного пакета Matlab.

При моделировании учтено, что источники контрольного тока, реализованные на практике, имеют следующие параметры:

- напряжение ГКТ  $U_{25} = 17$  В;
- цепь присоединения ГКТ  $L_{np} = 0,255$  Гн;  $C_{np} = 159$  мкФ;  $R_{np} = 2,7$  Ом.

При использовании для включения ГКТ основных вторичных обмоток трансформаторов напряжения ЗНОЛ.09-6 коэффициент трансформации по составляющим нулевой последовательности равен 20. Поэтому при моделировании в схеме



**Рис. 5.** Напряжение (верхняя осциллограмма) на поврежденной фазе и ток (нижняя осциллограмма) в месте замыкания при погасании дуги при первом прохождении переходного емкостного тока через ноль при пробивном напряжении, равном: а)  $0,95U_{\text{фм}}$ ; б)  $0,6U_{\text{фм}}$ ; в)  $0,45U_{\text{фм}}$ .

по рис. 2 параметры, приведенные к стороне высокого напряжения, равны:  $U'_{25}=340$  В;  $L'_{\text{пр}}=102$  Гн;  $C'_{\text{пр}}=0,3975$  мкФ;  $R'_{\text{пр}}=1080$  Ом.

Дуговое перемежающееся замыкание моделируется последовательностью кратковременных замыканий ключа  $K$  в схеме рис. 2. Время замкнутого состояния ключа принято равным  $0,5$  мс из условия, что при перемежающемся замыкании дуга гаснет при первом прохождении через ноль переходного тока дозаряда емкостей неповрежденных фаз, частота которого равна  $1000$  Гц.

Сопротивление  $R_3$ , через которое разряжается емкость сети, принято равным  $6,5$  Ом. При максимальном значении принимаемой в расчетах емкости сети  $17,5$  мкФ постоянная времени её разряда составляет  $0,11$  мс.

Наибольшее влияние фазы моментов пробоя можно ожидать при редких пробоях, поэтому влияние этого фактора рассмотрено при минимальном числе пробоев  $n=2$  и изменении  $t_i$  для первого пробоя от  $0$  до  $10$  мс, а для второго от  $10$  до  $20$  мс. Составляющая с частотой  $25$  Гц в токе замыкания при этом составляет  $0,49$  от тока при устойчивом замыкании и от фазы момента пробоев практически не зависит.

Число пробоев изоляции при перемежающихся замыканиях при прочих равных условиях зависит от значения пробивного напряжения. Минимальное число пробоев имеет место при пробивном напряжении, близком к амплитуде фазного напряжения, и увеличивается при его снижении. Однако при этом моменты пробоев изоляции располагаются в течение полупериода напряжения ГКТ неравномерно. Расположение моментов пробоя на оси времени при различных пробивных напряжениях  $u_{\text{пр}}$ , отнесенных к амплитуде фазного напряжения  $U_{\text{фм}}$ , показано на расчетных осциллограммах (рис. 5), полученных на модели сети с суммарным емкостным током замыкания  $5$  А. Как видно, имеет место последовательное увеличение числа пробоев, соответствующих  $n=2$ ;  $n=4$ ;  $n=6$ .

Число пробоев  $n$  на полупериод  $T/2$  и значения составляющей с частотой  $25$  Гц в токе замыкания, отнесенные к току при устойчивом замыкании, приведены в таблице. Емкость сети принята равной  $5$  мкФ.

**Таблица.** Зависимость составляющей тока замыкания с частотой  $25$  Гц от числа пробоев

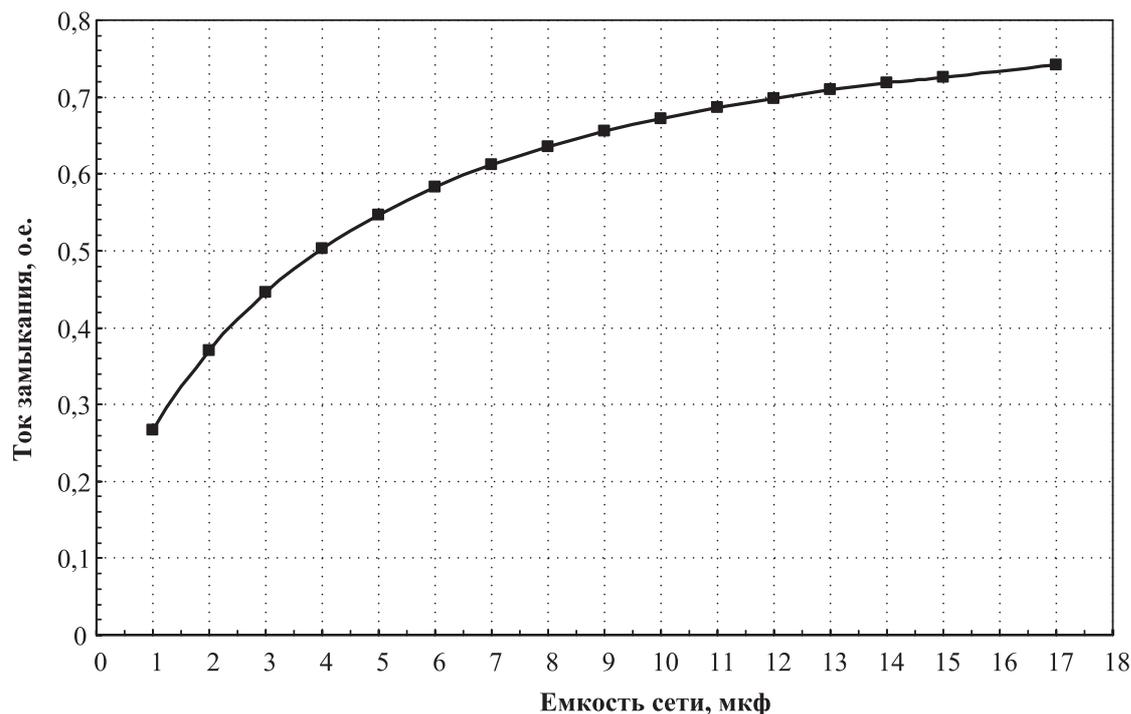
Число пробоев на полупериод, шт	2	4	6
Составляющая с частотой $25$ Гц в токе замыкания, о.е.	0,49	0,63	0,70

Влияние емкости сети на составляющую с частотой  $25$  Гц в токе замыкания при  $n=2$  представлено на рис. 6. Максимально возможное значение емкостного тока замыкания в сети  $6$  кВ принято равным  $20$  А. Этому току соответствует емкость внешней сети  $C_p=17,5$  мкФ.

По данным, приведенным на рис. 6, можно установить, при какой емкости внешней сети защита будет срабатывать при перемежающихся замыканиях в зависимости от коэффициента чувствительности, который определяется как отношение тока при устойчивом замыкании к принятому току срабатывания защиты.

### Выводы

1. Защита от замыканий на землю в обмотке статора генератора в блоке с реактированной отпайкой, выполненная на принципе наложения тока с частотой  $25$  Гц через трансформатор напряжения, принципиально работоспособна при дуговых перемежающихся замыканиях.
2. Вскрыт механизм формирования составляющей с частотой  $25$  Гц в токе замыкания, позволивший установить, что основными факторами, от которых зависит значение этой составляющей, являются число пробоев за полупериод тока  $25$  Гц и суммарная емкость сети относительно земли.



**Рис. 6.** Зависимость составляющей с частотой 25 Гц в токе замыкания от суммарной емкости сети (отнесено к току при устойчивом замыкании)

3. Количественная оценка влияния факторов, от которых зависит значение составляющей с частотой 25 Гц в токе замыкания, позволяет установить минимальное значение емкости

внешней сети для обеспечения срабатывания защиты при перемежающихся замыканиях в зависимости от коэффициента чувствительности защиты к току при устойчивом замыкании.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балаков Ю.Н., Мисриханов М.Ш., Шунтов А.В. Проектирование схем электроустановок. 2-е изд., стереотип. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 288 с., ил.
2. Вайнштейн Р.А., Доронин А.В., Наумов А.М., Юдин С.М. Защита от замыканий на землю в обмотке статора генераторов в схеме блоков с реактированной отпайкой // Известия вузов. Сер. Электромеханика. – 2011. – № 6. – С. 96–101.

3. Пашковский С.Н., Понамарев Е.А. Моделирование процессов в электрических сетях при перемежающихся дуговых замыканиях / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск, 2007. – 20 с.: ил. – Библ.: 3 назв. – русский. – Деп. в ВИНТИ РАН 28.09.2007 № 927-В2007

Поступила 17.05.2012 г.