

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stranges M.K.W., Stone G.C. Bogh D.L. Progress on IEC 6003418-42 for qualification of stator insulation for low-voltage and medium-voltage inverter duty application. — Proc. IEEE PCIC IEC 60034-18-42, 2007.
2. Карлов Б.В., Есин Е.К. Современные преобразователи частоты: методы управления и аппаратная реализация. — Силовая электроника, 2004, № 1.
3. Stone G.C., Culbert M., Lloyd B.A. Stator insulation problems associated with low voltage and medium voltage PWM drives. — Cement industry technical conf. record, 2009.
4. Martinez J.M., Amaris H., Sanz J. Frequency domain modeling of random wound motor windings for insulation stress analysis. — Electrical Engineering, 2006, № 88.
5. Martinez J.M. Transient voltage distribution along LV motor windings fed with PWM converters. Insulation ageing analysis. — Dissertation at Leganes (Madrid), 2005.

Авторы: Похолков Юрий Петрович окончил ТПИ по специальности «Электроизоляционная и кабельная техника» в 1961 г. В 1978 г. защитил докторскую диссертацию «Разработка методов расчета и обеспечения показателей надежности и качества электрической изоляции обмоток асинхронных двигателей» в Московском энергетическом институте. Заведующий кафедрой организации и технологии высшего профессионального образования.

Леонов Андрей Петрович окончил в 1996 г. ТПУ по специальности «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника». Канд. техн. наук.

Коробцов А.А. окончил ТПУ по специальности «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника». Аспирант ТПУ.

* * *

Устройство защиты обмотки ротора синхронного генератора от витковых и двойных замыканий на землю

НОВОЖИЛОВ А.Н., ПОЛИЩУК В.И., ВОЛИКОВА М.П.

Предложены способы выбора параметров нового устройства с использованием индукционных преобразователей для защиты обмотки ротора синхронного генератора от витковых замыканий.

Ключевые слова: синхронный генератор, обмотка ротора, витковое замыкание, релейная защита

Повреждения в обмотке ротора синхронного генератора (СГ) сопровождаются замыканием на землю в одной или двух точках, а также витковыми замыканиями (ВЗ) [1]. Замыкание на землю в одной точке обмотки ротора для СГ не опасно, так как ток в месте замыкания равен нулю. При двойном замыкании на землю или витковом ток в обмотке ротора между точками ее замыкания будет равен нулю. Кроме того, в точках замыкания возникает дуга. Отсутствие тока в части витков вызывает магнитную асимметрию ротора и сопровождается вибрацией, которая может привести к разрушению подшипников и шеек вала, а нередко и самого СГ. Электрическая дуга в точке замыкания, как правило, сильно повреждает обмотку и сердечник ротора.

Для защиты от замыканий на землю практически всегда используют защиту типа КЗР-3 [1–3]. Защитой от замыканий на землю во второй точке, что эквивалентно ВЗ, является переносной комплекс типа КЗР-2. Его включают в работу после появления первого замыкания на землю. А защиты от ВЗ ротора на СГ по разным причинам не устанавливаются вообще [4].

В то же время в [4] предложено простое и чувствительное устройство с применением двух распо-

Methods for selecting the parameters of a new device constructed using induction transducers for protecting the field winding of a synchronous generator from turn-to-turn faults are proposed.

Key words: synchronous generator, field winding, turn-to-turn fault, relay protection

ложенных диаметрально индукционных преобразователей [5] для защиты ротора СГ от ВЗ и двойных замыканий на землю одного из полюсов [4]. Однако из [4] не ясно, как эта защита будет работать при замыкании витков нескольких полюсов и при другом расположении индукционных преобразователей, не ясно также, как выбирать параметры и реализовывать защиту.

Устройство защиты. В соответствии с [4] при ВЗ или двойном замыкании на землю ток в замкнувшихся витках ротора СГ отсутствует, а МДС поврежденных полюсов и их магнитное поле уменьшаются пропорционально числу замкнувшихся витков w_k . При этом работа устройства защиты основана на сравнении магнитного поля лобового рассеяния СГ в области двух полюсов. Для этого используют пару индукционных преобразователей ИП1 и ИП2, которые смещены вдоль воздушного зазора на расстояние nt , где t – полюсное деление; n – число полюсных делений. Примеры вариантов размещения этих преобразователей для СГ с $p=3$ при $n=1$, p показаны, соответственно, на рис. 1, а–в. Пары полюсов обмотки ротора на этом рисунке помечены как $S1r-N1r$, $S2r-N2r$ и $S3r-N3r$, а пары полюсов обмотки статора – как $S1s-N1s$,

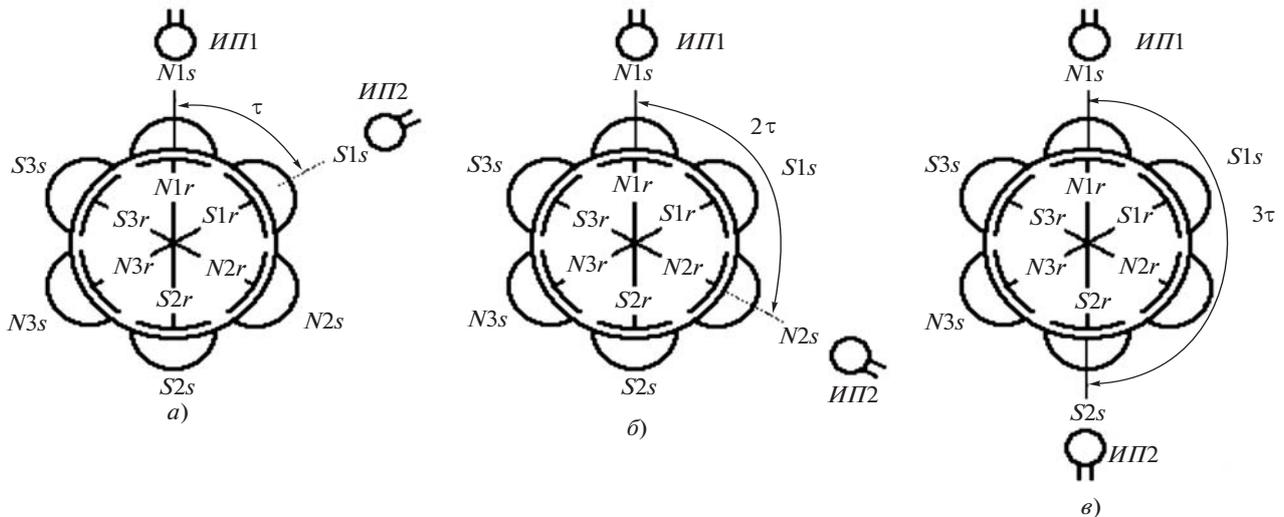


Рис. 1. Варианты размещения двух ИП на СГ с $p = 3$

$S2s$ - $N2s$ и $S3s$ - $N3s$. Защита в соответствии с [4] реализуется по блок-схеме рис. 2, где *ИП1* и *ИП2* – индукционные преобразователи, укрепленные на торцевом щите; $\Phi 1$ и $\Phi 2$ – фильтры с полосой пропускания до $f_1 = 50$ Гц, предназначенные для подавления всех высших гармонических в ЭДС e_{n1} и e_{n2} *ИП1* и *ИП2*, поэтому далее их считают синусоидальными; *БС* – блок сравнения e_{n1} и e_{n2} , причем выводы ИП присоединяют на вход фильтров таким образом, чтобы e_{n1} и e_{n2} на входе блока сравнения *БС* при любом n находились в противофазе; $\Phi 3$ – полосно-пропускающий фильтр для выделения из разности ЭДС ИП $De_n = e_{n1} + e_{n2}$ на выходе *БС* гармонических, появляющихся при возникновении виткового или двойного замыкания на землю в обмотке ротора; *ПЭ* – пороговый элемент срабатывания защиты; *ВН* – выключатель нагрузки.

В качестве ИП удобно использовать катушки от промежуточного реле [6]; преобразователи следует устанавливать в области торцевой зоны внутри или снаружи СГ, практичнее – на внешней стороне торцевого или подшипникового щита. Такое размещение снижает затраты на установку, не требует

разборки СГ при монтаже и согласования на установку ИП в мощных СГ с заводом-изготовителем. Для определения ЭДС e_{n1} и e_{n2} в *ИП1* и *ИП2*, а также их разности можно воспользоваться методами, изложенными в [7].

Выбор информационного признака. Он осуществляется графоаналитически. В ИП ЭДС e_{ns} индуцируется неподвижной обмоткой статора с током частотой $f_1 = 50$ Гц, а e_{nr} – вращающейся с угловой скоростью ω_r обмоткой ротора с постоянным током I_r . Из рис. 2 видно, что при размещении ИП напротив центров катушечных групп фазы статора с одинаковыми МДС значения ЭДС e_{ns} на выходе фильтров $\Phi 1$ и $\Phi 2$ с указанной схемой присоединения к ним *ИП1* и *ИП2* будут равны, а их сумма равна нулю. Поэтому ЭДС e_{ns} при анализе разности De_n в дальнейшем можно не учитывать. В то же время значение ЭДС e_{nr} определено МДС полюса ротора, поэтому при исправном роторе эти ЭДС также равны между собой, а при поврежденном – различны. В итоге получается, что сумма ЭДС De_n от *ИП1* и *ИП2* на выходе фильтров $\Phi 1$ и $\Phi 2$ определена суммой ЭДС e_{nr} от полюсов обмотки ротора.

В результате при синхронном вращении ротора с неповрежденной обмоткой ЭДС первого преобразователя

$$e_{n1} = e_{nr} = E_m \cos \omega t, \tag{1}$$

где E_m – амплитудное значение ЭДС от МДС неповрежденного полюса ротора; ω – угловая частота сети; t – время.

При витковом или двойном замыкании на землю обмотки одного из полюсов ротора его МДС уменьшится на $I_r \omega_k$, так как ток в замкнувшихся витках можно считать равным нулю (здесь I_r – ток

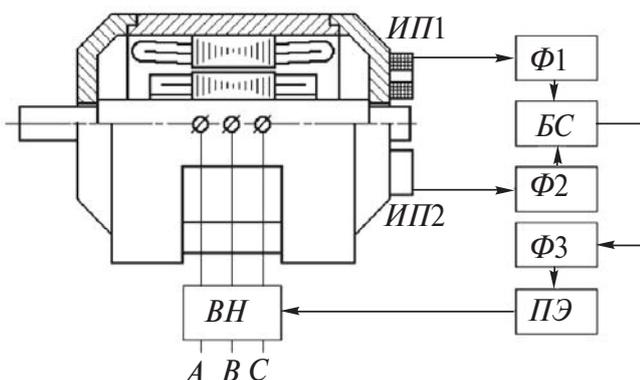


Рис. 2. Блок-схема устройства на двух ИП для защиты ротора СГ

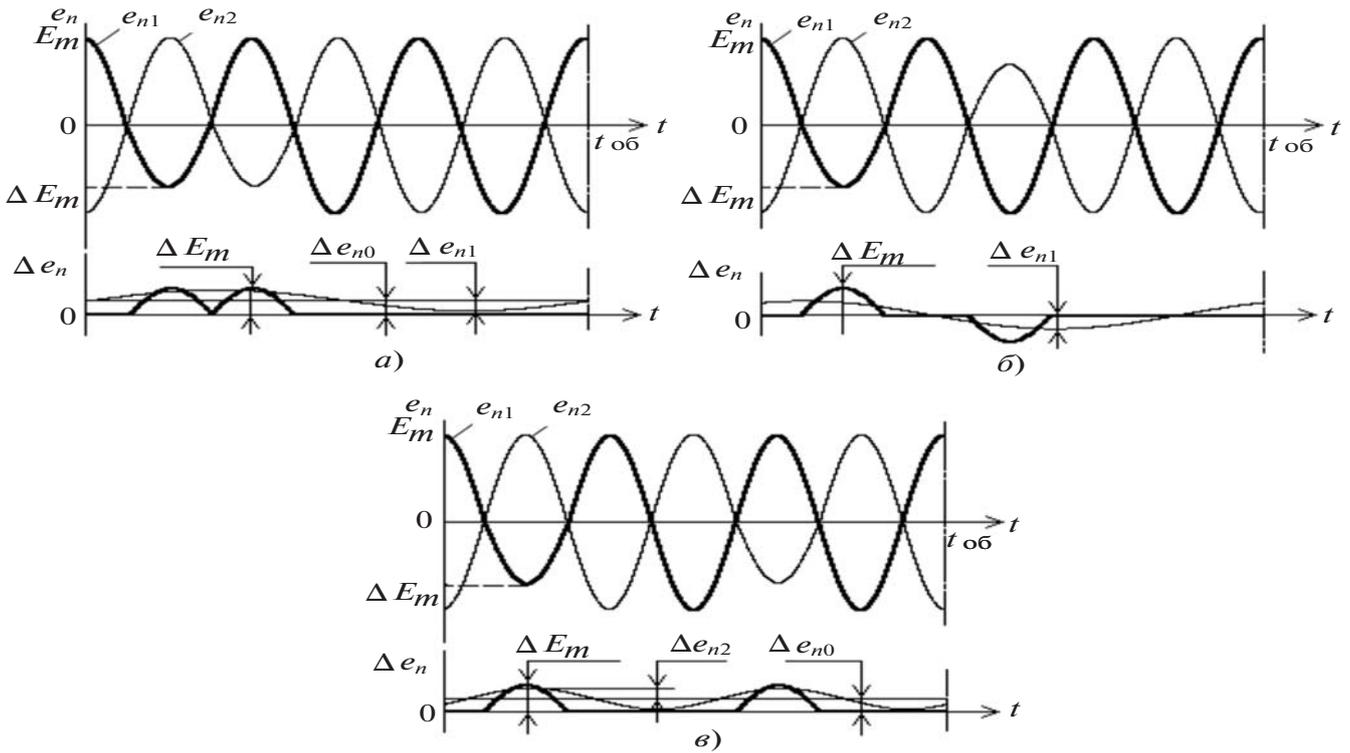


Рис. 3. ЭДС ИП и их сумма при $p = 3, n = 1, p$ и $w_k / w_c = 0,3$

в обмотке ротора). Это приведет к уменьшению на ΔE_m амплитуды полуволны ЭДС e_{n1} , индуцированной в ИП1 этим полюсом. С учетом того, что все полюса ротора проходят около ИП1 за время $t_{об} = p / f_1$ одного полного оборота ротора, зависимость ЭДС $e_{n1} = f(t)$ при замыкании части витков в одном из полюсов СГ с $p = 3$ будет соответствовать той, которая приведена на рис. 3. Эту зависимость при разложении в ряд Фурье и преобразовании с учетом влияния фильтра Ф1 и [8] при числе одноименных полюсов ротора p можно представить в виде:

$$e_{n1} = E_m \cos \omega t - \frac{2\Delta E_m}{pp} \sum_{i=1}^p A_i \cos \frac{\omega t}{p} i \quad (2)$$

где $\Delta E_m = E_m w_k / w_c$; w_c – число витков в обмотке полюса.

Коэффициенты членов ряда ЭДС e_{n1} для СГ с различным числом одноименных полюсов проще всего получить методом численного разложения в ряд Фурье [8].

Если второй преобразователь сместить в торцевой зоне СГ по отношению к первому на $t, 2t$ или $3t$, то его ЭДС на выходе фильтра Ф2 с учетом схемы подключения измерительных преобразователей ИП1 и ИП2 к фильтрам Ф1 и Ф2 будет соответствовать кривым, изображенным на рис. 3, а–в соответственно. Из рисунков видно, что при смещении

ИП2 на n полюсных делений индуцированную в нем ЭДС e_{n2} можно представить как

$$e_{n2} = E_m \cos(\omega t + a) - \frac{2\Delta E_m}{pp} \sum_{i=1}^p A_i \cos \frac{\omega t}{p} i + a \quad (3)$$

где $a = np$ – угол, учитывающий смещение второго преобразователя.

Тогда ЭДС на входе фильтра Ф3 определяется как сумма выражений (2) и (3):

$$De_n = \frac{2\Delta E_m}{pp} \sum_{i=1}^p A_i \cos \frac{\omega t}{p} i + a + (-1)^n \sum_{i=1}^p A_i \cos \frac{\omega t}{p} i + a \quad (4)$$

Это выражение можно получить также графоаналитически [8] с использованием зависимостей $e_{n1} = f(t), e_{n2} = f(t)$ и $De_n = f(t)$ на рис. 3, а–в, где $k_{en} = 4\Delta E_m / pp$ – коэффициент; $De_{n0} = k_{en} A_0$; $De_{n1} = k_{en} A_1$; $De_{n2} = k_{en} A_2$.

В результате при построении защиты ротора генератора с $p = 3$ со смещением второго преобразователя на $t, 2t$ и $3t$ выражения для ЭДС на входе Ф3 будут иметь вид:

$$De_n = \frac{4\Delta E_m}{pp} \left[0,5 + 0,9743 \cos \frac{\omega t}{p} + 0,9 \cos \frac{2\omega t}{p} \right] \quad (5)$$

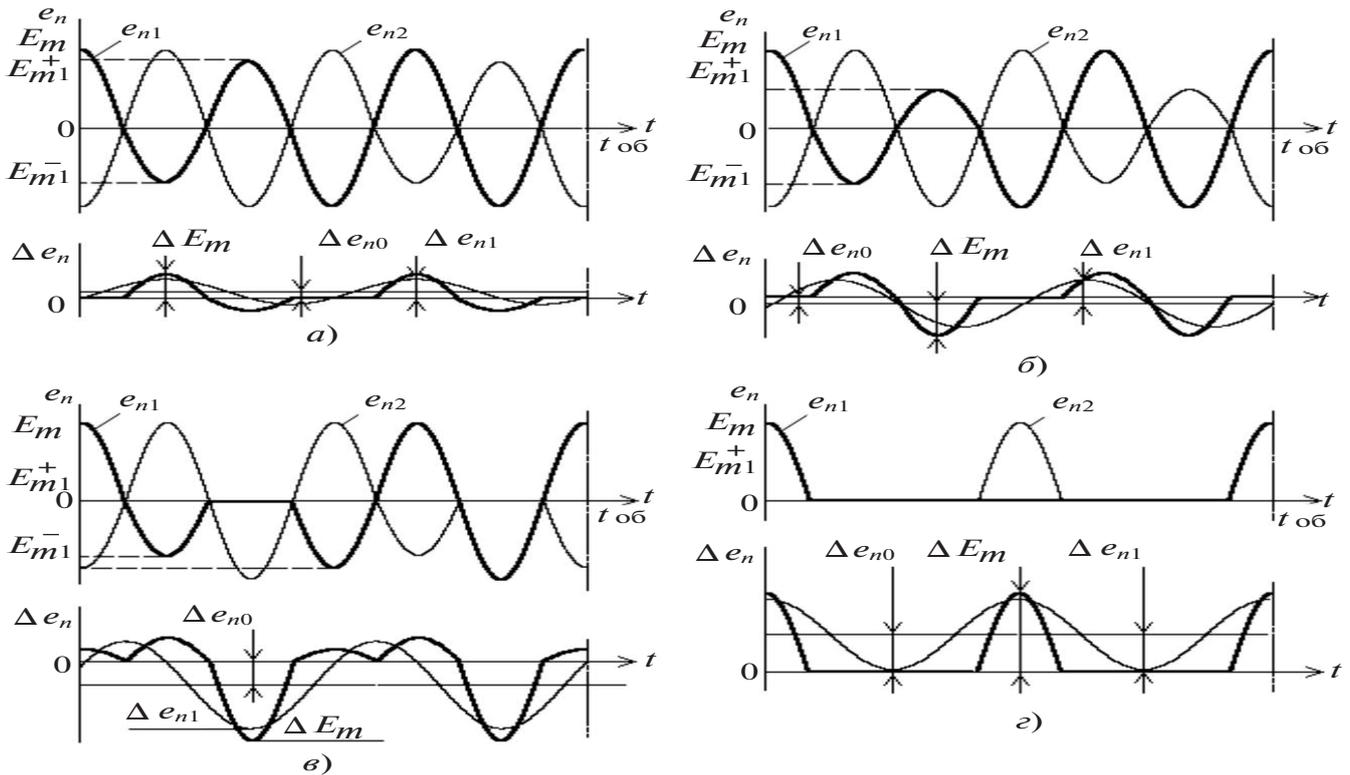


Рис. 4. ЭДС ИП и их сумма при числе пар полюсов СГ $p=3$

$$De_n = \frac{4DE_{n0}}{pp} \cos \frac{wt}{p} + 0,9743 \cos \frac{2wt}{p} \quad (6)$$

$$De_n = \frac{4DE_{n0}}{pp} \cos \frac{wt}{p} + 0,5 + 0,9 \cos \frac{2wt}{p} \quad (7)$$

Анализ этих выражений и рис. 3 показывает, что для построения защиты ротора с $p=3$ от виткового или двойного на землю замыкания можно использовать все те составляющие De_n , которые приведены в выражениях (5)–(7). Однако использование второго члена ряда $A_2 \cos(2wt/p)$ предпочтительней, так как он присутствует при любом размещении измерительных преобразователей. Выбор же информационного признака в каждом конкретном случае зависит от наличия и значения в устройстве защиты сигналов, от которых следует отстраиваться при неповрежденной обмотке ротора.

При двойном замыкании обмотки ротора на землю может замкнуться любое число витков его обмотки, а форма сигнала $De_n = f(t)$ будет произвольной. На рис. 4,а показаны кривые ЭДС при замыкании 30% витков обмотки первого и 15% второго полюсов, на рис. 4,б – 30% первого и 50% второго полюсов, на рис. 4,в – 30% первого, полностью второго и 15% третьего полюсов и на рис. 4,г – всей обмотки ротора, кроме первого полюса. Рисунки показывают, что при любом двойном замыкании на землю обмотки ротора СГ с $p=3$

$p=3$ второй член ряда $A_2 \cos(2wt/p)$ «присутствует» в сигнале на входе фильтра Ф3.

Реализация защиты. Из анализа $De_n = f(t)$, например СГ с $p=3$, становится ясно, что в качестве информационного признака при любом расположении ИП1 и ИП2 защиты удобно использовать второй член ряда Фурье De_{n2} с частотой $f_{Dn2} = 33,3$ Гц. В общем случае член ряда Фурье, используемый в качестве информационного признака для СГ с другим числом одноименных полюсов, определяется аналогично.

С одной стороны, время срабатывания защиты $t_{с.з}$ определено временем надежного распознавания повреждения. Из рис. 2–4 ясно, что для выявления ВЗ требуется измерение магнитного поля всех полюсов ротора машины, а это возможно за время $t_{об}$ одного полного поворота вала. Для надежного распознавания повреждения ротора потребуется как минимум два или три таких поворота. В результате можно считать что

$$t_{с.з} = (2-3)t_{об} \quad (8)$$

Таким образом, для турбогенератора с $n=3000$ об/мин значение $t_{с.з}$ составляет 0,04–0,06 с. Гидрогенераторы более тихоходны, поэтому, например, для машины ВГС 1525/135-120 с $n=50$ об/мин это время составит 1,66–2,5 с.

С другой стороны, значение $t_{с.з}$ зависит от времени протекания переходных процессов в СГ. Это

вызвано тем, что при неповрежденном СГ сигнал с частотой f_{Dn2} на входе фильтра $\Phi 3$ появляется во время переходных процессов из-за наличия в ЭДС e_{n1} и e_{n2} апериодической составляющей. В результате на выходе фильтра $\Phi 3$ появляется ЭДС небаланса $De_{n2нб}$. Самого большого значения $De_{n2нб}$ достигает при трехфазном коротком замыкании из режима холостого хода. Однако в СГ такое замыкание отключается быстродействующими защитами за время 0,02–0,06 с. Если время срабатывания защиты от виткового замыкания в обмотке ротора турбогенератора по (8) увеличить вдвое, а в гидрогенераторах оставить без изменения, то при трехфазном коротком замыкании в обмотке статора она просто не успеет сработать.

Режим гашения магнитного поля ротора также можно не учитывать, если защиту выводить из работы одновременно с включением аппарата гашения поля.

Набор или сброс значительной части нагрузки у турбогенераторов, а также процесс возбуждения поля ротора происходят за время, большее $t_{с.з}$. В этих режимах работы значения $De_{n2нб}$ на выходе фильтра $\Phi 3$ невелики и различны. Поэтому порог срабатывания защиты $De_{n2с.з}$ определяют по значению, большему из них. У гидрогенераторов значение $t_{с.з}$ можно не учитывать.

Защита должна выдавать сигнал или отключать СГ, если ЭДС выбранного информационного признака при замыкании w_k витков в обмотке ротора превысит

$$De_{n2с.з} = De_{n2нб} k_{отс}, \quad (9)$$

где $k_{отс} = 1,3, 1,5$ – коэффициент отстройки, учитывающий неточность в определении $De_{n2нб}$.

Реализовывать устройство защиты от витковых замыканий и двойных замыканий на землю обмотки ротора по блок-схеме на рис. 2 проще всего на микропроцессорной базе или персональном компьютере. В этом случае математической основой его программного обеспечения будет метод численного разложения в ряд Фурье. В устройстве должна предусматриваться возможность работы в режимах УСТАВКА и ЗАЩИТА. В режиме УСТАВКА выставляются тип СГ, число p и расстояния между ИП1 и ИП2, согласование и измерение подаваемого на вход устройства сигнала, коэффициент отстройки $k_{отс}$, а также рассчитываются значение небаланса $De_{нб}$, время и порог срабатывания за-

щиты. В режиме ЗАЩИТА устройство контролирует целостность обмотки ротора, а при ее повреждении в зависимости от числа замкнувшихся витков выдает сигнал обслуживающему персоналу или отключает СГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. – М.: Энергия, 1976.
2. Чернобров Н.В. Релейная защита. – М.: Энергия, 1974.
3. Ванин В.Н. Релейная защита блоков турбогенератор – трансформатор. – М: Энергоиздат, 1982.
4. Новожилов А.Н., Горюнов В.И., Полищук В.И. и др. Способ защиты обмотки ротора синхронного генератора от витковых замыканий на двух индукционных преобразователях. – Электричество, 2010, №8.
5. Новожилов А.Н., Воликова М.П., Андреева О.А., Новожилов Т.А. Особенности конструкции индукционных преобразователей для релейной защиты и диагностики электрических машин переменного тока. – Электричество, 2009, №4.
6. Какуевичкий Л.И., Смирнова Т.В. Справочник реле защиты и автоматики. – М.: Энергия, 1972.
7. Новожилов А.Н., Воликова М.П., Полищук В.И. и др. Моделирование магнитных полей методом зеркальных отображений с коррекцией токов для синтеза защит электрических машин. – Электричество, 2008, №11.
8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1973.

Авторы: Новожилов Александр Николаевич окончил Павлодарский индустриальный институт в 1977 г. по специальности «Электрические сети и системы». В 2002 г. в Алматинском институте «Энергетика и связь» защитил докторскую диссертацию «Построение релейной защиты асинхронного двигателя с повышенной чувствительностью на встроенных преобразователях (теория, расчеты, реализация)». Профессор кафедры «Автоматизация и управление» Павлодарского государственного университета (Казахстан).

Полищук Владимир Иосифович окончил Павлодарский индустриальный институт в 1990 г. по специальности «Электрические станции». Кандидатскую диссертацию «Развитие теории построения защит ротора синхронного генератора от витковых замыканий» защитил в 2007 г. Доцент кафедры «Электротехнические сети и системы» ТПУ.

Воликова Марина Павловна окончила Павлодарский государственный университет в 2002 г. В 2006 г. защитила кандидатскую диссертацию «Разработка защит фазного ротора асинхронного двигателя от витковых замыканий». Доцент кафедры «Автоматизация и управление» Павлодарского государственного университета (Казахстан).