

# Цифровая защита от замыканий на землю в обмотке статора синхронного генератора, работающего на сборные шины

Замыкания на землю в обмотке статора – наиболее частые электрические повреждения синхронных генераторов [1]. Для генераторов однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) гораздо опаснее, чем для остальных частей сети 6-10 кВ. Дуга в месте повреждения способна оплавить активную сталь статора, что в итоге приводит к длительному и дорогостоящему ремонту первичного оборудования. В соответствии с п. 3.2.38 ПУЭ и п. 5.1.24 РД 34.20.501-95 (ПТЭ) при токе в месте ОЗЗ от 5 А и более генератор должен автоматически отключаться средствами релейной защиты абсолютной селективности.

**Автор**  
Романов Ю.В.

**С**ледует отметить, что, когда замыкание возникает вблизи нейтрали обмотки статора, ток в месте повреждения не достигает опасного значения. Однако при этом резко возрастает вероятность возникновения очень опасных витковых коротких замыканий (КЗ) и двойных замыканий. Для предотвращения перехода ОЗЗ в более тяжелые виды повреждения зона действия защиты должна охватывать 100 % витков обмотки статора, включая нейтраль. Помимо выполнения данного требования защита должна учитывать сложность процесса большинства замыканий, обусловленную перемежающейся дугой в месте повреждения.

Согласно [2], для работающих на сборные шины генераторов более характерны двойные замыкания на землю, нежели ОЗЗ. Это объясняется тем, что самым вероятным провоцирующим фактором пробоя изоляции обмотки статора являются перенапряжения в ходе довольно ча-

стных внешних ОЗЗ, которые могут быть весьма значительными. Если в случае устойчивого однофазного замыкания напряжения в неповрежденных фазах не превышают  $\sqrt{3}U_{\text{ф.ном}}$ , где  $U_{\text{ф.ном}}$  – номинальное фазное напряжение генератора, то при повторно-кратковременном замыкании они способны достичь значения  $4,5 U_{\text{ф.ном}}$  [3]. Из-за высокой вероятности возникновения и большой опасности для первичного оборудования двойного замыкания на землю работающие на сборные шины генераторы должны оснащаться особо надежной защитой от данного вида повреждения. Продольная дифференциальная токовая защита (ДЗГ) не всегда чувствительна к двойным замыканиям. Высокое быстродействие и высокую чувствительность, большую в 3–4 раза, чем у ДЗГ, обеспечивает токовая защита нулевой последовательности (ТЗНП) с первичным током срабатывания порядка 100 А. В соответствии с п. 3.2.39 ПУЭ



Рис. 1. Внешний вид устройства «TOP 300 ЗГ 505»

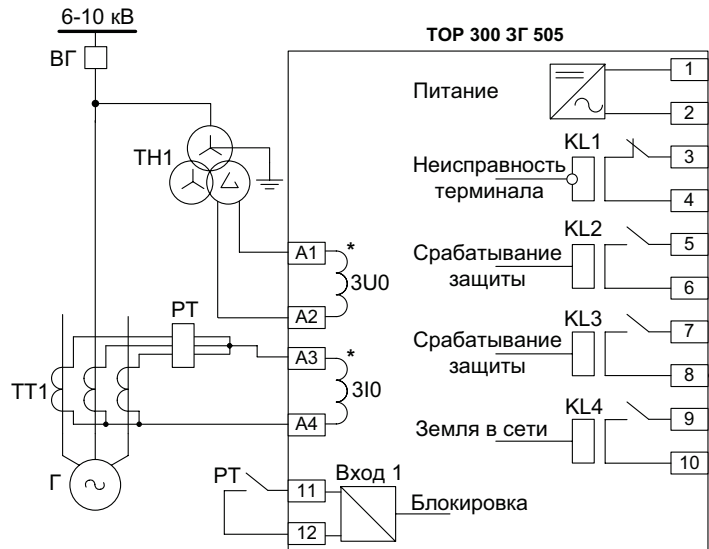


Рис. 2. Схема подключения устройства к измерительным цепям, входы и выходы защиты

она должна предусматриваться при установке на генераторе трансформатора тока нулевой последовательности (ТНП). Однако в настоящее время по ряду причин ТНП на генераторах устанавливается редко, а без него ТЗНП не может быть применена в чистом виде.

Существуют рекомендации по использованию в качестве защиты генераторов, работающих на сборные шины, от ОЗЗ и двойных замыканий на землю в цепи статора блока селективной защиты типа ЗГНП, реализованного на микроэлектронной элементной базе [4]. Основные достоинства этой защиты [2]:

- чувствительность как к устойчивым, так и к повторно-кратковременным ОЗЗ;
- охват всей обмотки статора, включая нейтраль;
- наличие ступени для выполнения высокочувствительной и достаточно быстродействующей защиты от двойных замыканий на землю;
- не требуется использование ТНП и прочего дополнительного оборудования, врезаемого в первичную цепь.

В настоящее время ООО «ИЦ Бреслер» производит усовершенствованный аналог защиты ЗГНП-4.4. Данное устройство типа «TOP 300 ЗГ 505» (рис. 1) реализовано на микропроцессорной элементной базе.

На рис. 2 приведена схема подключения «TOP 300 ЗГ 505» по измерительным цепям. Устройство содержит два аналоговых входа – один токовый

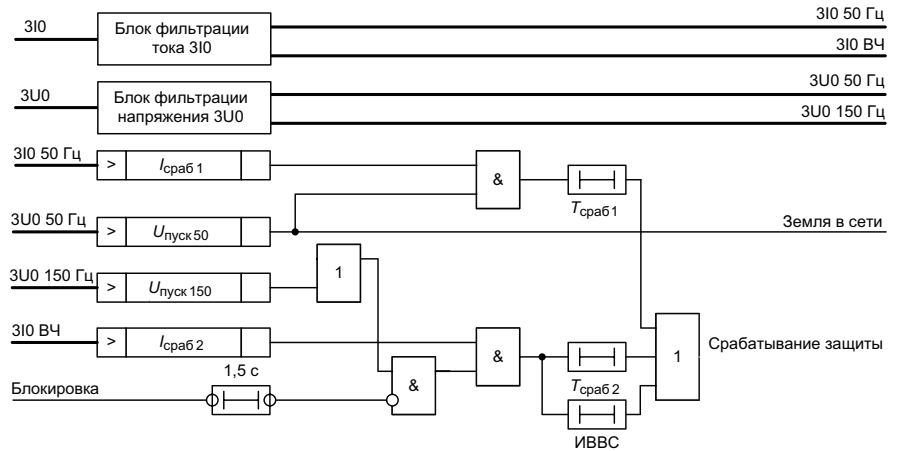


Рис. 3. Функциональная логическая схема защиты

и один напряжения. Вход переменного напряжения подключается к выводам соединенной в «разомкнутый треугольник» дополнительной обмотки трансформатора напряжения ТН1, установленного на линейных выводах генератора. Вход переменного тока подключается к трехтрансформаторному фильтру тока нулевой последовательности (ФТНП), образованному обмотками класса 10Р или 5Р трехфазной группы ТТ1, установленных в цепи генератора со стороны линейных выводов. Рекомендуется использовать ТТ, расположенные в непосредственной близости к защищаемому генератору. Таким образом, защита выполнена по току и напряжению нулевой последовательности (на рис. 2 обозначены как «3I0» и «3U0», соответственно).

Следует отметить, что область применения «TOP 300 ЗГ 505» охватывает генераторы со схемой соединения обмотки статора как в «звезду», так и в «треугольник». Функциональная логическая схема устройства представлена на рис. 3. Защита состоит из двух ступеней. Первая ступень выполнена на основе измерительного органа (ИО) тока максимального действия с уставкой « $I_{сраб1}$ », реагирующего на замер модуля составляющей промышленной частоты тока нулевой последовательности «3I0 50 Гц». Ступень предназначена для защиты от двойных замыканий на землю с одной точкой в обмотке статора генератора. ИО тока надежно отстроен от токов небаланса ФТНП, вызванных переходными процессами и насыщением ТТ1. Первая ступень срабатывает с выдержкой времени « $T_{сраб1}$ ».

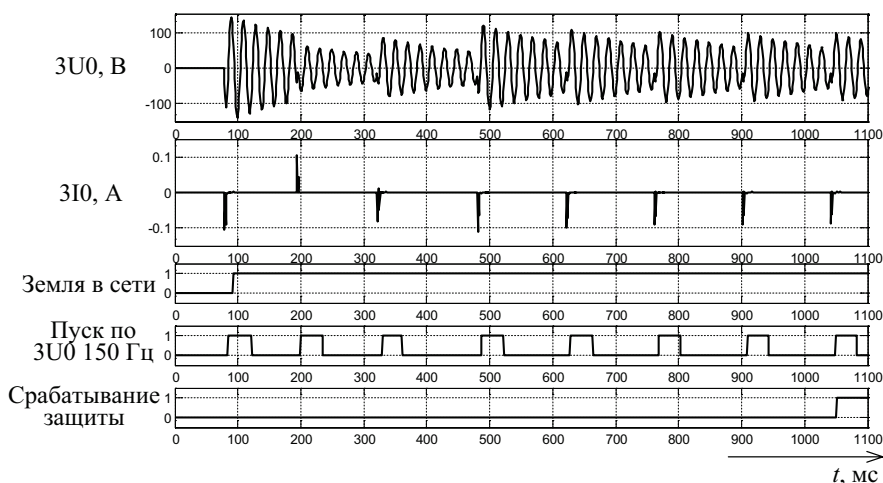


Рис. 4. Пример работы защиты в режиме повторно-кратковременного ОЗЗ в обмотке статора через перемежающуюся дугу

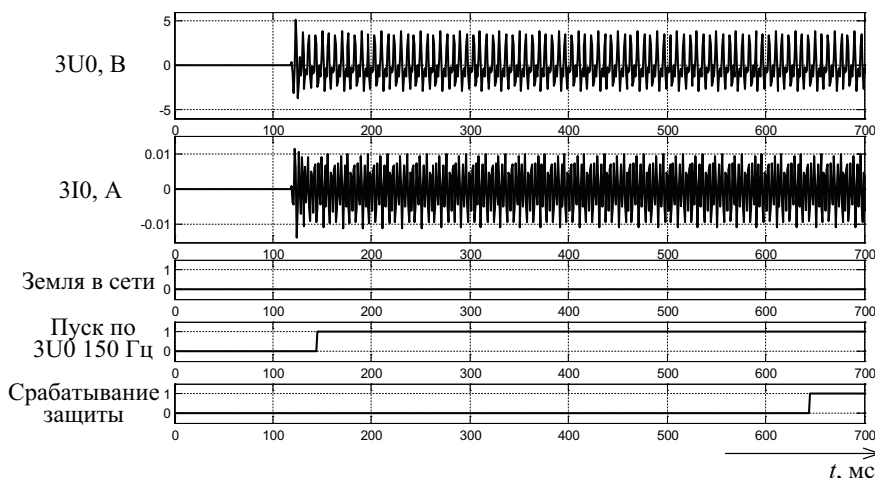


Рис. 5. Пример работы защиты при ОЗЗ в обмотке статора вблизи нейтрали

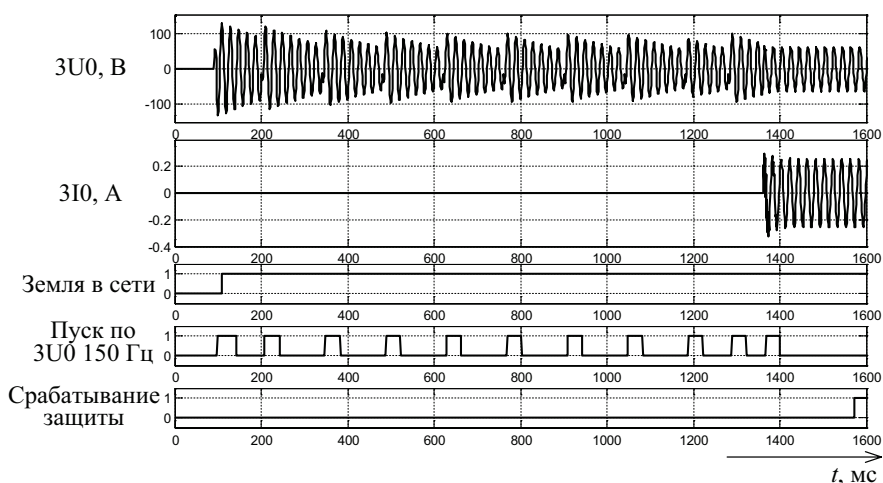


Рис. 6. Пример работы защиты при двойном замыкании на землю со второй точкой в обмотке статора

Вторая ступень защиты выполнена на основе ИО тока максимального действия с уставкой « $I_{сраб2}$ », реагирующего на замер действующего значения высокочастотной составляющей тока нулевой последовательности «3I0 ВЧ», и предназначена для защиты от ОЗЗ в обмотке статора защищаемого генератора. ИО тока реализован с компенсацией емкостного тока для надежной отстройки от внешних повторно-кратковременных ОЗЗ. Вторая ступень защиты выполнена с выдержкой времени « $T_{сраб2}$ », предназначенной для реагирования на устойчивые ОЗЗ. Действие защиты при повторно-кратковременных ОЗЗ обеспечивается интегральной выдержкой времени, обозначенной на рис. 3 как «ИВВС». Использование ИВВС позволяет надежно отстроиться от однократных самоликвидирующихся пробоев изоляции и от переходных процессов при замыканиях в сети.

Обе ступени защиты выполнены с пуском от ИО напряжения максимального действия с уставкой « $U_{пуск50}$ », реагирующего на замер составляющей промышленной частоты напряжения нулевой последовательности «3U0 50 Гц». Если обмотка статора соединена в «звезду», то данный ИО не позволяетпустить вторую ступень при ОЗЗ в нейтрали и примыкающей к ней части обмотки. В этом случае надежный пуск осуществляется с помощью ИО напряжения максимального действия с уставкой « $U_{пуск150}$ », реагирующего на замер составляющей третьей гармоники напряжения нулевой последовательности «3U0 150 Гц».

ИО напряжения с уставкой « $U_{пуск50}$ » также действует на выходное реле терминала KL4 для выполнения сигнализации о наличии замыкания на землю в сети генераторного напряжения (сигнал «Земля в сети»). С помощью реле KL4 может быть реализована защита от ОЗЗ в обмотке статора отключённого от сети генератора.

Блокировка второй ступени защиты при внешних коротких замыканиях, когда возможно её излишнее срабатывание, осуществляется с помощью входного сигнала «Блокировка» от дискретного входа 1 (см. рис. 2) и выдержки времени на возврат 1,5 с. На дискретный вход 1 следует заводить контакты реле, реагирующих на внешние КЗ. К примеру, это могут быть ИО тока (без выдержки времени) макси-

мальной токовой защиты генератора (реле тока РТ на рис. 2).

Рассмотрим примеры работы устройства «ТОР 300 ЗГ 505». На рис. 4 приведена осциллограмма работы защиты в режиме повторно-кратковременного ОЗЗ в обмотке статора через перемежающуюся дугу. Первый пробой изоляции происходит в момент времени 77 мс. Появляется напряжение 3U0, в результате чего срабатывает пусковой ИО напряжения по каналу промышленной частоты и формируется сигнал «Земля в сети». Пуск по напряжению осуществляется непрерывно в ходе развития процесса повреждения. Под действием высокочастотной составляющей тока 3I0, преимущественно вызванной переходным процессом, срабатывает ИО тока второй ступени и запускает ИВВС. Через 973 мс после возникновения первого пробоя изоляции (на восьмом пробое) ИВВС выдает сигнал срабатывания защиты.

Пример работы защиты при ОЗЗ вблизи нейтрали обмотки статора приведен на рис. 5. Повреждение возникает в момент времени 118 мс. Составляющая промышленной частоты в напряжении 3U0 практически отсутствует, а надежный пуск защиты осуществляется по составляющей 150 Гц. Под действием высших гармоник в токе 3I0, обусловленных несинусоидальностью ЭДС генераторов и нелинейностью нагрузки, срабатывает ИО тока второй ступени и запускает выдержку времени с уставкой « $T_{сраб2}$ ». Сигнал срабатывания защиты появляется через 526 мс после возникновения повреждения.

На рис. 6 приведен пример работы защиты при двойном замыкании на землю со второй точкой в обмотке статора. В момент времени 89 мс возникает ОЗЗ в сети. Практически одновременно на выходе защиты появляется сигнал «Земля в сети». Вторая ступень правильно определяет зону повреждения – если бы было неселективное срабатывание, то оно бы появилось на восьмом перекрытии изоляции, т.е. в момент времени примерно 1050 мс, чего не наблюдается. Вторая точка замыкания появляется в обмотке статора в момент времени 1377 мс, а спустя 213 мс срабатывает первая ступень защиты. Заметим, что ток в месте повреждения принимает весьма небольшое значение (не

Таблица. Уставки защиты

Обозначение	Диапазон регулирования	Значение по умолчанию	Наименование уставки
$I_{сраб1}$	от 50 до 400 (шаг 1)	100	Ток срабатывания первой ступени защиты, мА
$I_{сраб2}$	от 0,5 до 6,0 (шаг 0,1)	1,0	Ток срабатывания второй ступени защиты, мА
$U_{пуск50}$	от 0 до 100 (шаг 1)	15	Напряжение срабатывания пускового ИО составляющей 50 Гц напряжения нулевой последовательности, В
$U_{пуск150}$	от 0 до 10 (шаг 0,1)	1,0	Напряжение срабатывания пускового ИО составляющей 150 Гц напряжения нулевой последовательности, В
$C_r$	от 0 до 5,00 (шаг 0,01)	0,20	Емкость обмотки статора и прилегающей ошиновки, мкФ
$T_{сраб1}$	от 0 до 30 000 (шаг 1)	150	Время срабатывания первой ступени защиты, мс
$T_{сраб2}$	от 0 до 30 000 (шаг 1)	500	Время срабатывания второй ступени защиты при устойчивом однофазном замыкании на землю, мс

более 5 % от номинального тока генератора), явно недостаточное для срабатывания ДЗГ.

Устройство «ТОР 300 ЗГ 505» потребляет по цепям оперативного питания не более 18 Вт в режиме срабатывания. Сопротивление цепей тока входа на номинальной частоте не более 0,5 Ом. Перечень уставок защиты приведен в таблице.

### ВЫВОДЫ

1. Микропроцессорное устройство «ТОР 300 ЗГ 505» производства ООО «ИЦ Бреслер» реализует эффективную защиту от замыканий за землю в обмотке статора генератора, работающего непосредственно на сборные шины.

2. Первая ступень защиты представляет собой высокочувствительную защиту от двойных замыканий на землю без использования трансформаторов тока нулевой последовательности.

3. Вторая ступень защиты реагирует как на устойчивые, так и повторно-кратковременные однофазные замыкания на землю в любой точке обмотки статора генератора.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Värmekraftaggregatens Reläskyddssystem // The Swedish Trunklinecommittee, Operations Committee, The Working Group for Protection Systems. – 21 October 1991.

2. Алексеев В.Г. Токовая защита ЗГНП-4.2 от замыканий на землю в обмотке статора генератора, работающего на сборные шины // Электрические станции. – 2006. – № 2. – С. 51–56.

3. Шуйн В.А. Расчет перенапряжений при дуговых прерывистых замыканиях на землю. Зависимость от режима заземления нейтрали // Новости Электротехники. – 2009. – № 4 (58). – С. 38–41.

4. О выполнении селективной защиты от замыканий на землю в обмотке статора турбогенераторов, работающих на сборные шины // Информационное письмо ИП-03-98 (Э) Департамента стратегии развития и научно-технической политики РАО «ЕЭС России». – 1998.