

Влияние электромагнитных переходных процессов на функционирование токовых защит от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ

Шуин В.А., д-р техн. наук, Сарбеева О.А., Чургова Е.С., магистранты

Приведены результаты исследований динамических режимов функционирования токовых защит от замыканий на землю при дугowych прерывистых повреждениях. На основе проведенных методом физико-математического моделирования исследований показано, что чувствительность указанных защит и область их применения могут быть значительно увеличены.

Ключевые слова: электрические сети, токовые защиты нулевой последовательности, дугowych прерывистые замыкания на землю, физико-математическое моделирование.

Influence of the electromagnetic connecting processes on operation of current protection from closing to land in electric set 6-10 SQ

The Brought results of the studies dynamic mode operation current for-shield from closing to the land under arc intermittent damages. On base called on kneaded-house physico-mathematical modeling of the studies is shown that sensitivity of specified protection and area of their using can be are vastly increased.

Keywords: electric networks, current protection to zero sequence, arc intermittent closing to land, physico-mathematical modeling.

Введение. В электрических сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или заземлением через резистор, в качестве защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), как правило, применяются токовые защиты нулевой последовательности (ТЗНП), основанные на использовании составляющих промышленной частоты. Существенное влияние на устойчивость функционирования ТЗНП оказывают токи электромагнитных переходных процессов, возникающих при дугowych перебегающих ОЗЗ.

Дуговой прерывистый характер тока в месте повреждения (рис. 1) характерен, прежде всего, для начальной стадии развития практически всех ОЗЗ в кабелях и электрических машинах [1–4 и др.].

Особую опасность дугowych перебегающих ОЗЗ, сопровождающиеся значительными перенапряжениями по всей электрически связанной сети, представляют в кабельных сетях собственных нужд электростанций и систем электроснабжения

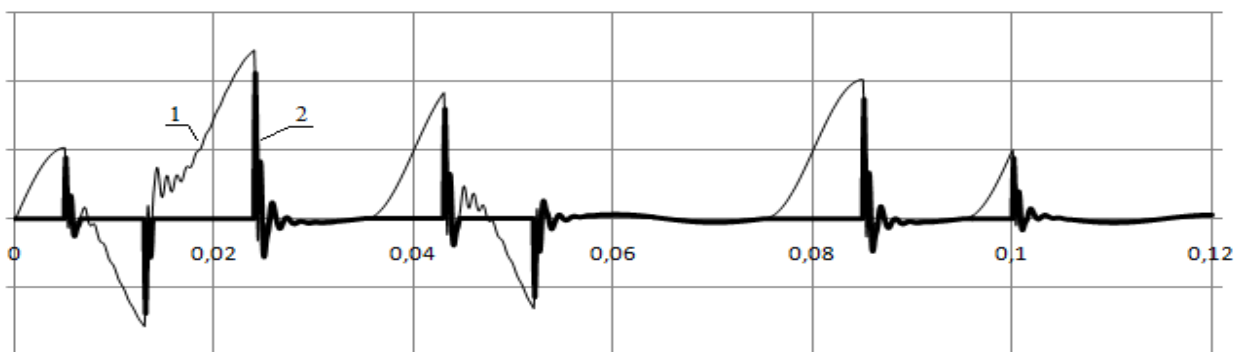


Рис. 1. Дуговой прерывистый ОЗЗ в электрической сети с изолированной нейтралью

Постановка задачи. По применяемой в настоящее время методике, влияние токов электромагнитных переходных процессов при дугowych перебегающих ОЗЗ на функционирование ТЗНП учитывается при выборе тока срабатывания $I_{0\text{с.з}}$ из условия отстройки от собственного емкостного тока защищаемого присоединения:

$$I_{0\text{с.з}} \geq K_{отс} K_{пер} I_{C\text{собс}}, \quad (1)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки; $I_{C\text{собс}}$ – собственный емкостный ток ОЗЗ защищаемого присоединения; $K_{пер}$ – коэффициент, учитывающий влияние переходных процессов.

Значение $K_{пер}$ зависит от особенностей элементной базы, на которой выполнены измерительные органы тока (ИОТ) ТЗНП, а для микропроцессорных защит – от алгоритмов функционирования измерительной и логической частей функции ТЗНП. Для ИОТ, выпол-

ненных на электромеханической элементной базе, рекомендуется [5] значение $K_{пер}$ принимать равным 4–5, что приводит к соответствующему уменьшению чувствительности защиты и ограничению области ее применения. Для ТЗНП с ИОТ, выполненными на микроэлектронной и микропроцессорной базе, значения $K_{пер}$ приближенно принимаются равными 2,0–2,5 [6, 7 и др.].

Эффективность срабатываний ТЗНП при внутренних ОЗЗ оценивается коэффициентом чувствительности при устойчивых металлических повреждениях

$$K_{ч} = \frac{I_{C\Sigma} - I_{C\text{собс}}}{I_{0\text{с.з}}} = \frac{I_{C\Sigma} - I_{C\text{собс}}}{K_{отс} K_{пер} I_{C\text{собс}}} \geq K_{ч.мин}, \quad (2)$$

где $K_{ч.мин} = 1,2$ для защиты с действием на сигнал и $K_{ч.мин} = 1,5$ для защиты с действием на отключение (для ТЗНП электродвигателей рекомендуется принимать $K_{ч.мин} = 2$ [7]).

Из (1) и (2) можно получить условие применимости ТЗНП в электрических сетях с изолированной нейтралью:

$$\frac{I_{C\text{собс}}}{I_{C\Sigma}} \leq \frac{1}{1 + K_{отс} K_{пер} K_{ч.мин}}. \quad (3)$$

Для сети с высокоомным заземлением нейтрали через резистор R_N при $R_N \approx X_{C\Sigma} = 1/3\omega C_{0\Sigma}$ условие применимости ТЗНП имеет вид

$$\frac{I_{C\text{собс}}}{I_{C\Sigma}} \leq \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \frac{(K_{отс} K_{пер} K_{ч.мин})^2}{2}}}. \quad (4)$$

Согласно (2)–(4), при больших значениях коэффициента $K_{пер}$ чувствительность защиты и область ее применения значительно уменьшаются.

Исследования динамических режимов функционирования ТЗНП, обосновывающие значения коэффициента $K_{пер}$ для ТЗНП, выполненных на различной элементной базе, насколько нам известно, не проводились. Поэтому основной задачей явилась оценка влияния электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ на функционирование ТЗНП с измерительными органами тока на различной элементной базе в целях уточнения методики выбора тока срабатывания (т.е. значений $K_{пер}$ в (1)) и области применения данной защиты в электрических сетях среднего напряжения, работающих с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали через резистор.

Метод исследований. Для исследования динамических режимов функционирования устройств релейной защиты обычно применяется математическое или физическое имитационное моделирование. Математическое моделирование эффективно при исследовании переходных процессов в электроэнергетических объектах и системах (ЭЭО и ЭЭС), однако возможности его применения для анализа динамических режимов

функционирования устройств релейной защиты (УРЗ) ограничены из-за трудностей или невозможности создания достаточно точных математических моделей последних. Для УРЗ, выполненных на микропроцессорной базе, создание математических моделей функций защиты, имитирующих их функционирование в условиях влияния электромагнитных переходных процессов, как правило, невозможно вообще, так как методы и алгоритмы формирования и обработки входных информационных и логических величин таких устройств являются коммерческой тайной фирм-производителей. Поэтому при исследовании динамических режимов функционирования УРЗ на различной элементной базе более эффективен метод физического моделирования, при котором на входы реального исполнения устройства защиты подаются токи и напряжения, сформированные на физической модели исследуемого ЭЭО. В качестве физической модели исследуемых ЭЭО во многих случаях можно использовать программно-технические измерительные комплексы серии РЕТОМ (или их аналоги), предназначенные для проверки характеристик и параметров настроек УРЗ, а также анализа их работы в режимах реальных повреждений. Для исследования влияния электромагнитных переходных процессов на функционирование УРЗ можно использовать предусмотренную в устройствах типа РЕТОМ возможность воспроизведения любого электромагнитного процесса, записанного в COMTRADE-формате, и фиксации реакции УРЗ на приложенное воздействие. Однако возможности устройств серии РЕТОМ не всегда позволяют получить тестовые сигналы, соответствующие реальным токам и напряжениям переходного процесса, при повреждениях в сложных ЭЭО. Для формирования подобных тестовых сигналов целесообразно использовать математическое моделирование сложного ЭЭО, например, с использованием интегрированной системы моделирования Matlab с пакетом расширения Simulink, с последующим преобразованием специальной программой полученных на модели токов и напряжений в COMTRADE-формате. Таким образом, для исследования динамических режимов функционирования системы «ЭЭО – УРЗ» и, в частности, ТЗНП электрических сетей среднего напряжения, на наш взгляд, наиболее эффективно применение метода имитационного физико-математического моделирования с применением программно-аппаратного комплекса типа РЕТОМ (рис. 2).

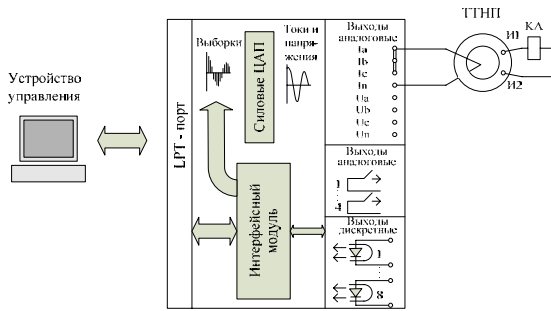


Рис. 2. Структурная схема системы для физико-математического моделирования динамических режимов функционирования ТНПЗ

Математическая модель электрической сети среднего напряжения для исследования электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ. Математическая модель электрической сети 6–10 кВ для исследования динамических режимов функционирования ТЗНП при дуговых прерывистых ОЗЗ, реализо-

ванная с использованием системы моделирования Matlab и пакета расширения Simulink, приведена на рис. 3.

Трехфазная модель сети включает:

- 1) генерирующий источник;
 - 2) две линии электропередачи Line1 и Line2 с распределенными параметрами;
 - 3) эквивалентированную часть сети, представленную схемой замещения с сосредоточенными параметрами;
 - 4) коммутационную аппаратуру: выключатели и ключ OZZ, имитирующий ОЗЗ в заданной точке электрической сети;
 - 5) виртуальные измерители тока и напряжения, имитирующие трансформаторы тока и напряжения, многоканальные осциллографы.
- При необходимости к любой точке сети можно подключить и другие виртуальные приборы.

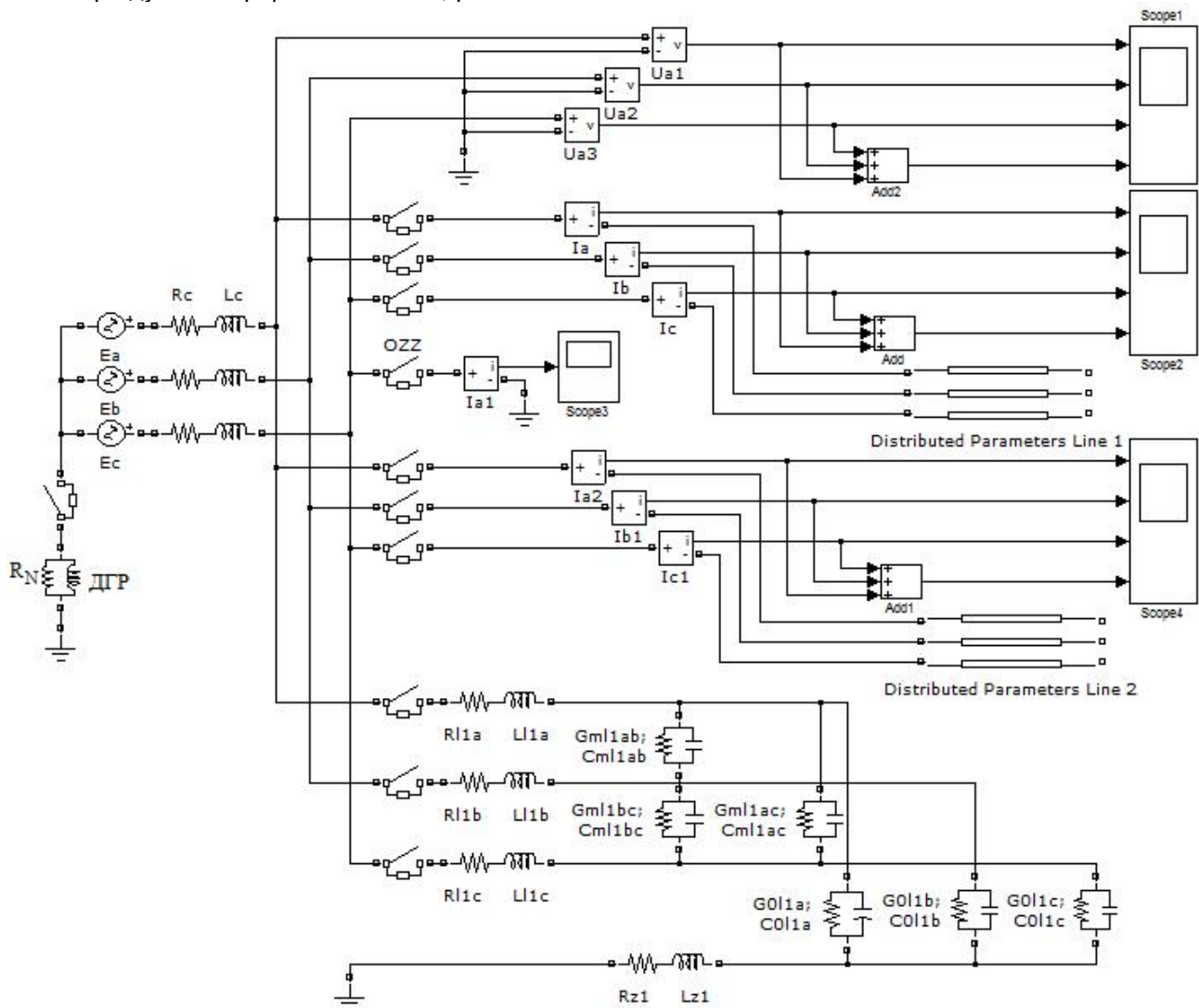


Рис. 3. Схема модели электрической сети среднего напряжения для исследования динамических режимов функционирования защит от замыканий на землю

Источник питания в схеме представлен фазными ЭДС e_A, e_B, e_C , индуктивностями L_C и активными сопротивлениями R_C в каждой фазе. Каждая фазная ЭДС представляет собой сумму основной гармонической составляющей (50 Гц) и высших гармоник. Для моделирования сети с резонансным заземлением нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР) или через резистор в нейтраль генерирующего источника включена параллельная RL цепь, моделирующая дугогасящий реактор с параметрами $R_{ДГР}$ и $L_{ДГР}$, или заземляющий резистор R_N .

Конфигурация сети, режим заземления нейтрали, параметры элементов, положение точки, вид повреждения и другие параметры могут изменяться в зависимости от целей и задач исследований, а также особенностей принципа действия и (или) алгоритма функционирования исследуемого УРЗ.

Банк тестовых сигналов для исследования динамических режимов функционирования различных исполнений ТЗНП. С учетом поставленной задачи под тестовым сигналом понимается ток $3i_0$ в неповрежденном присоединении при внешнем дуговом перемежающемся ОЗЗ, полученный для наиболее тяжелых (с точки зрения отстроенности ТЗНП от внешних повреждений) расчетных условий. Расчетные условия (место возникновения ОЗЗ в сети, частота и условия возникновения повторных пробоев изоляции и гашения дуги тока ОЗЗ, параметры сети и неповрежденного присоединения и др.) зависят от особенностей конкретного исполнения ТЗНП, определяемых элементной базой, принципом действия (алгоритмом функционирования) защиты, диапазоном изменения уставок по току срабатывания. Поэтому для различных исполнений ТЗНП в общем случае необходимы различные тестовые сигналы.

При исследованиях условий отстроенности от внешних дуговых перемежающихся ОЗЗ различных исполнений ТЗНП были приняты наиболее тяжелые расчетные условия:

– электрическая сеть 6–10 кВ содержит только кабельные линии (волновые сопротивления кабельных линий (КЛ) значительно меньше

волновых сопротивлений воздушных линий (ВЛ), поэтому амплитуды бросков переходного тока при дуговых перемежающихся ОЗЗ в кабельных сетях больше);

– суммарный емкостный ток сети $I_{C\Sigma} \leq 20$ А при номинальном напряжении сети $U_{ном} = 10$ кВ и $I_{C\Sigma} \leq 30$ А при $U_{ном} = 6$ кВ;

– максимальная длина КЛ не превышает 6–8 км (по условиям допустимой потери напряжения) при сечении жил 120–240 мм²;

– ОЗЗ металлическое (переходное сопротивление в месте повреждения равно нулю) на шинах защищаемого объекта;

– время затухания свободных составляющих в токах переходного процесса при ОЗЗ 3–5 мс [1–3 и др.];

– дуговое перемежающееся ОЗЗ имеет характер, соответствующий модели Петерсена или модели Петерса и Слепяна (рис. 4):

• при дуговом прерывистом ОЗЗ по модели Петерсена амплитуда переходного тока при повторных пробоях может увеличиваться в 2,0–2,5 раза, по модели Петерса и Слепяна – в 1,5–2,0 раза;

• при ОЗЗ по модели Петерсена гашение дуги происходит не при первом, а при последнем переходе через нуль среднечастотной (зарядной) составляющей тока переходного процесса;

– используется наиболее распространенный тип трансформатора тока нулевой последовательности (ТТНП) ТЗЛМ с неразъемным сердечником (близкие характеристики имеют ТТНП типа ТЗ и ТЗЛ).

Исследования на модели сети показали, что существенное влияние на амплитудное и действующее значение броска переходного тока в неповрежденном присоединении оказывает соотношение между собственным емкостным током защищаемого присоединения $I_{C\text{собс}}$ и суммарным емкостным током сети $I_{C\Sigma}$ (рис. 4). Бросок переходного тока в неповрежденном присоединении достигает максимального значения при $I_{C\Sigma} \rightarrow I_{C\text{собс}}$. С учетом этого при формировании тестовых сигналов принималось, что в предельном (худшем) случае $I_{C\text{собс}}/I_{C\Sigma} = 1$.

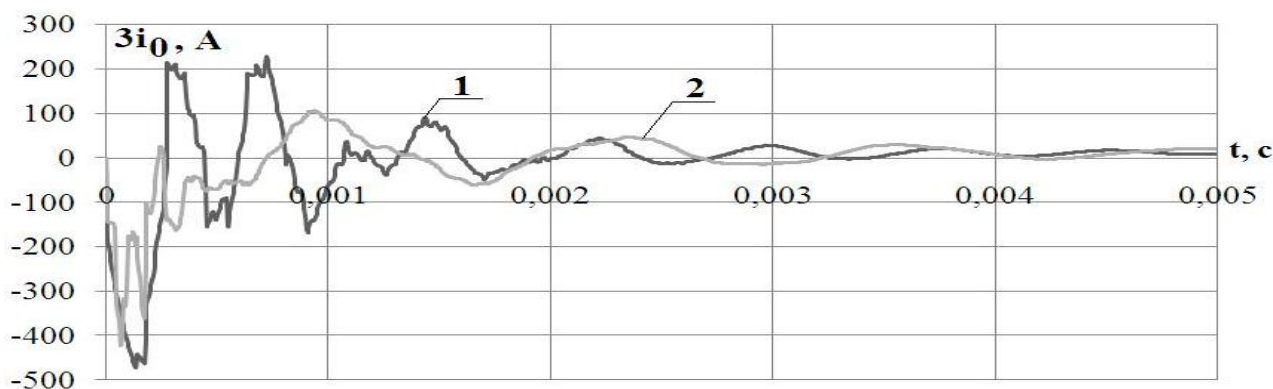


Рис. 4. Влияние отношения $I_{C\text{собс}}/I_{C\Sigma}$ на бросок переходного тока в неповрежденном присоединении: 1 – бросок переходного тока при $I_{C\text{собс}}/I_{C\Sigma} = 1$; 2 – бросок переходного тока при $I_{C\text{собс}}/I_{C\Sigma} = 0,25$

Для приведенных основных расчетных условий на математической модели сети (рис. 3) получены тестовые сигналы для исследования динамических режимов функционирования ТЗНП, выполненной с применением наиболее часто используемых в качестве ИОТ типов реле: электромагнитных реле типа РТ-40/0,2 и РТ-40/0,6, электронного реле РТЗ-50, микроэлектронного реле РТЗ-51 (рис. 5). Полученные методом математического моделирования тестовые сигналы преобразовывались в осциллограммы в *COMTRADE*-формате.

Эквивалентирование тестовых сигналов. В соответствии с техническими данными на устройства типа РЕТОМ, максимальная частота воспроизводимых гармонических сигналов, представленных в форме осциллограмм в *COMTRADE*-формате, не должна превышать 500 Гц. Испытания устройства типа РЕТОМ-51 показали, что затухающие колебательные сигналы воспроизводятся устройством РЕТОМ-51 практически без искажений при

частотах до ~1500–2000 Гц. В спектре частот токов переходного процесса при ОЗЗ могут содержаться составляющие и более высоких частот. В связи с этим возникает необходимость в ограничении (с помощью фильтров) верхней частоты тестовых сигналов, полученных на модели сети 6–10 кВ (рис. 3). При ограничении с помощью фильтра верхней частоты тестовых сигналов уменьшается их амплитуда и действующее значение, поэтому возникает необходимость в выборе критерия эквивалентности фильтрованного и нефильтрованного сигналов. Для ТЗНП с измерительными органами тока, выполненными на электрохимической элементной базе, в качестве такого критерия было принято равенство действующих значений указанных сигналов (рис. 6), для ТЗНП с измерительными органами на микроэлектронной и микропроцессорной базе – равенство амплитуд исходного сигнала и сигнала, полученного на выходе фильтра низших частот.

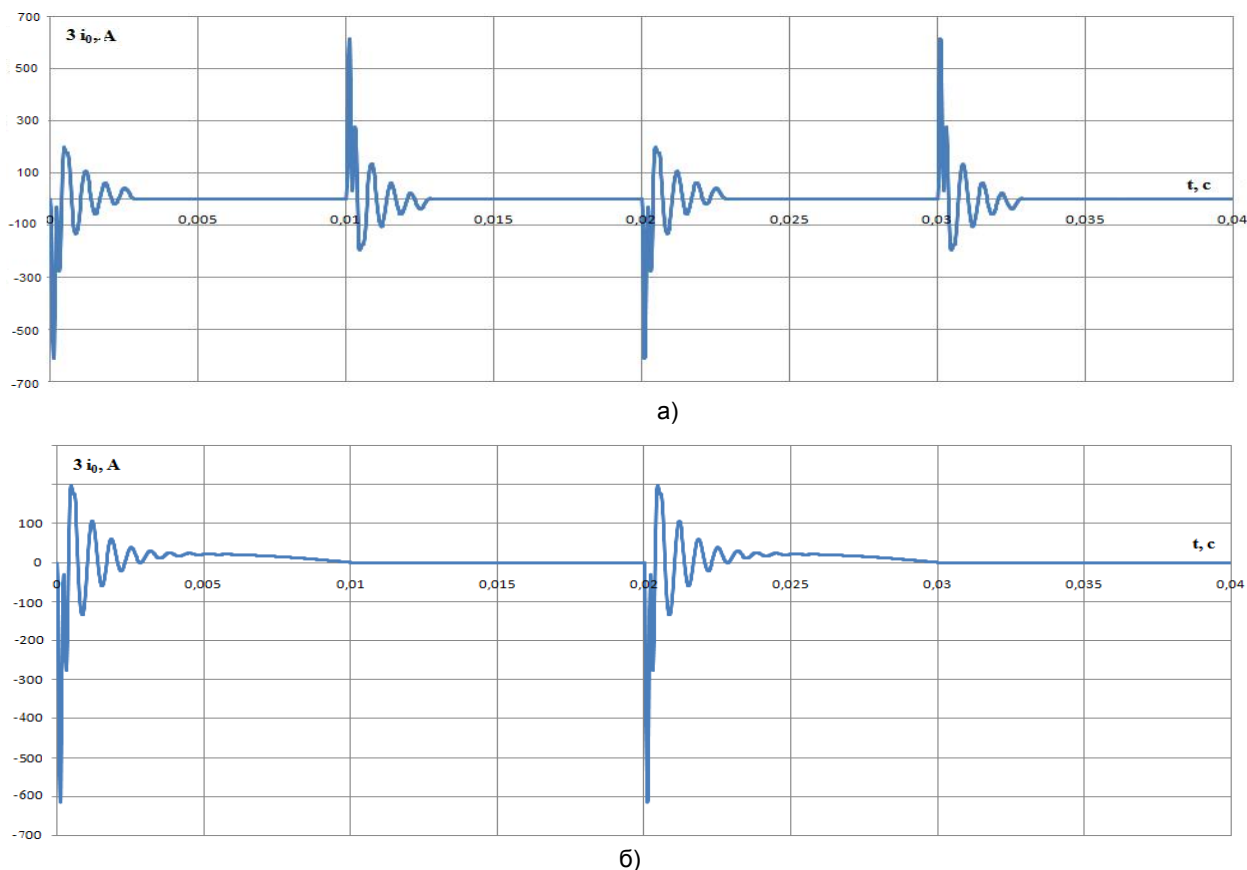


Рис. 5. Тестовые сигналы для исследования динамических режимов функционирования ТЗНП: а – дуговое перемежающееся ОЗЗ по модели Петерсена; б – дуговое перемежающееся ОЗЗ по модели Петерса и Слепяна

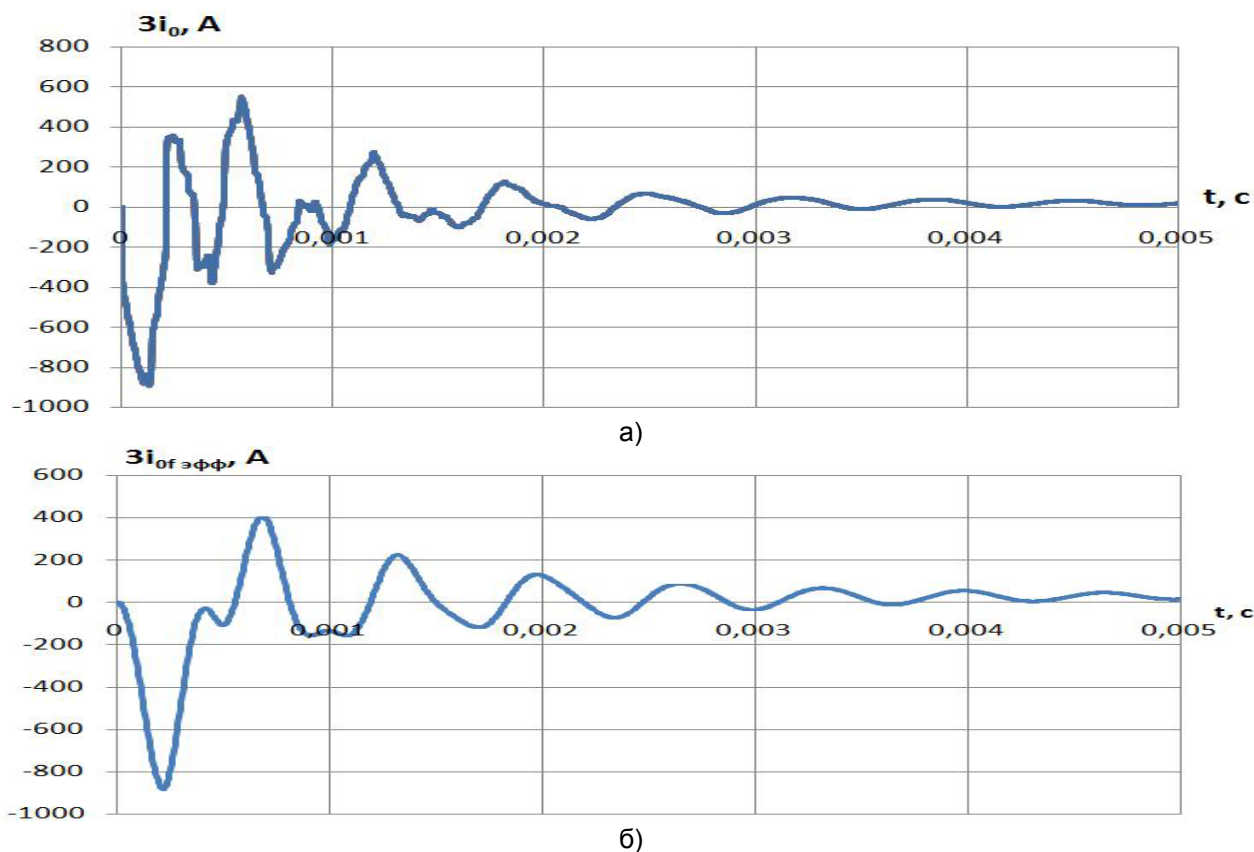


Рис. 6. Эквивалентирование тестовых сигналов для ТЗНП с измерительными органами тока на электромеханической базе: а – исходный сигнал; б – эквивалентный сигнал, пропущенный через фильтр нижних частот с частотой среза 2000 Гц и имеющий равное с исходным действующее значение

Методика исследований динамических режимов функционирования ТЗНП.

Для определения минимальных значений коэффициента, обеспечивающих устойчивость несрабатываний ТЗНП при внешних дуговых перемежающихся ОЗЗ, по выражению (1) при $K_{пер} = 1$ определялся минимальный ток срабатывания $I_{0 \text{ с.з. мин}}$, затем на вход ИОТ (реле тока КА (рис. 2)) подавался расчетный тестовый сигнал общей длительностью ~1 с, и ток срабатывания ТЗНП увеличивался до обеспечения устойчивых несрабатываний защиты.

Расчетное значение $K_{пер}$, обеспечивающее устойчивые несрабатывания ТЗНП, определялось по формуле

$$K_{пер} = \frac{I_{0 \text{ с.з.}}}{I_{0 \text{ с.з. мин}}} \quad (5)$$

Осциллограммы (рис. 7), полученные на устройстве РЕТОМ-51, иллюстрируют работу ТЗНП с реле типа РТ-40 при различных значе-

ниях тока срабатывания $I_{0 \text{ с.з.}}$ (т.е. при различных значениях коэффициента $K_{пер}$ в (1)).

С использованием созданного банка тестовых сигналов на устройстве РЕТОМ-51 по изложенной методике проведены исследования динамических режимов функционирования указанных выше исполнений ТЗНП и определены минимальные значения коэффициента $K_{пер}$, обеспечивающие устойчивые несрабатывания ТЗНП с различными исполнениями ИОТ при наиболее тяжелых расчетных условиях внешнего дугового перемежающегося ОЗЗ. В табл. 1 приведены основные параметры тестовых сигналов, в табл. 2 дано сопоставление значений коэффициентов $K_{пер}$, рекомендуемых существующими методиками расчетов уставок ТЗНП, и значений $K_{пер}$, полученных методом физико-математического моделирования динамических режимов работы различных исполнений ТЗНП.

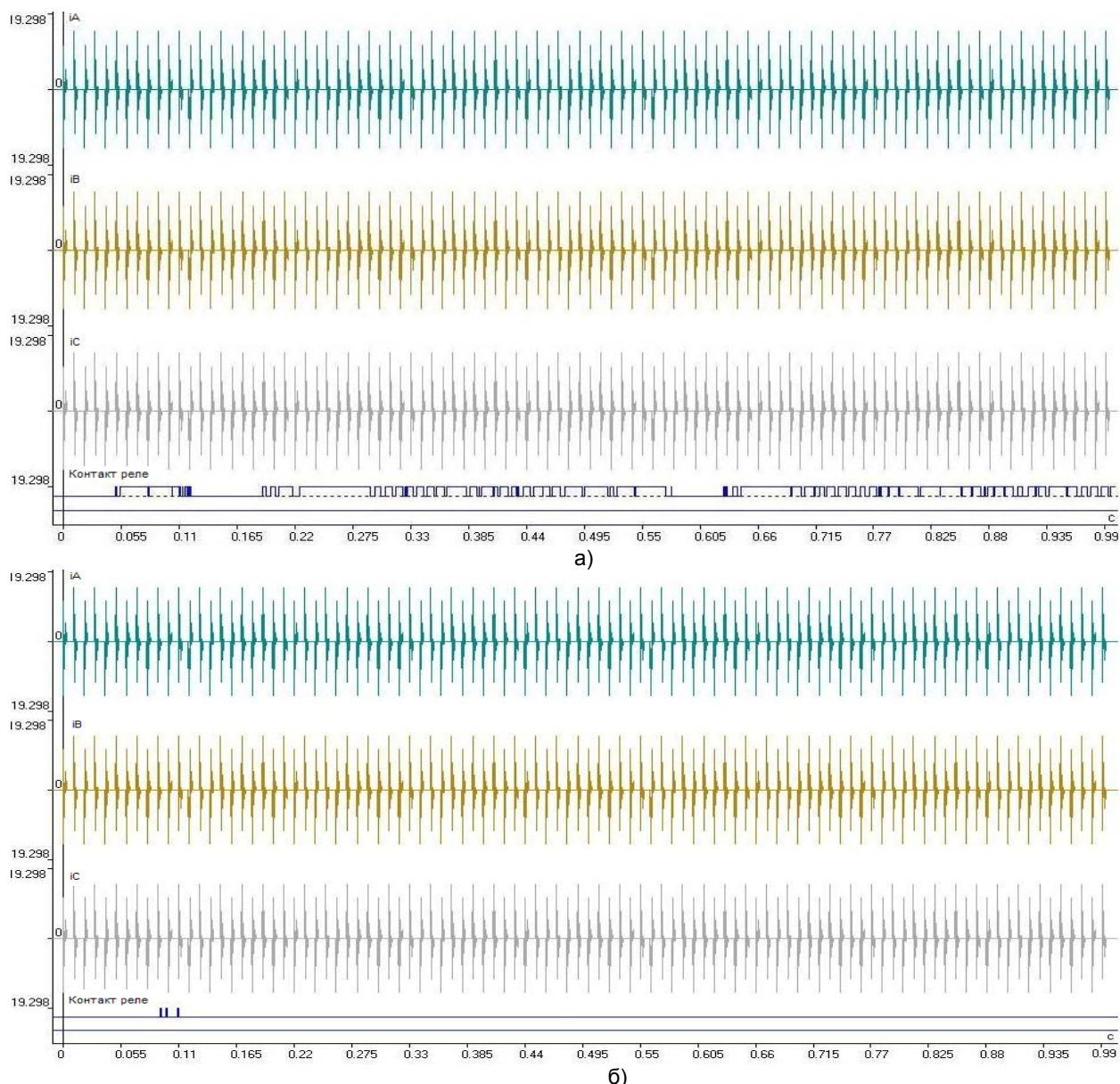


Рис. 7. Осциллограммы, иллюстрирующие функционирование ТЗНП с ИОТ на базе электромеханического реле типа РТ-40/0,6 в условиях дугового прерывистого ОЗЗ при разных значениях тока срабатывания защиты $I_{0.c.з} = K_{пер} I_{0.c.з.мин}$: а – $K_{пер} = 1$; б – $K_{пер} = 1,8$

Таблица 1. Параметры тестовых сигналов для исследования динамических режимов функционирования ТЗНП при дуговых прерывистых ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью

Тип ИОТ ТЗНП	$I_{0.c.з.мин}$, А	I_C собс., А	$I_{п.пер. макс.}$, А	Время затухания свободных составляющих тока Zi_0 , мс	Модель дугового ОЗЗ	Эффективное значение тока Zi_0 , А	Длительность тестового сигнала, с
Реле РТ-40/0,2 (параллельное соединение обмоток)	9,6	8	737	5	Петерсена	101	1
Реле РТ-40/0,6 (параллельное соединение обмоток)	7	5,83	876	5	Петерсена	119	1
Реле РТ-40/0,6 (последовательное соединение обмоток)	5	4,17	780	5	Петерсена	107	1
РТЗ-50 (диапазон уставок d)	3,1	2,583	650	5	Петерсена	80	1
РТЗ-51	0,78	0,65	664	5	Петерса и Слепяна	55	1

Таблица 2. Результаты оценки условий устойчивости несрабатываний различных исполнений ТЗНП при внешних дуговых перемежающихся ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью

Тип ИОТ ТЗНП	Значения $K_{пер}$	
	по существующей методике расчета	полученные на основе исследований
Реле РТ-40/0,2 (параллельное соединение обмоток)	4–5	~1,5
Реле РТ-40/0,2 (последовательное соединение обмоток)	4–5	~1,5
Реле РТ-40/0,6 (параллельное соединение обмоток)	4–5	1,5–2
Реле РТ-40/0,6 (последовательное соединение обмоток)	4–5	1,5–2
РТЗ-50 (диапазон уставок d)	3–3,5	1,5–2
РТЗ-51	2–2,5	~1

Результаты исследований и их оценка. Анализ результатов исследований позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Рекомендуются существующими методиками расчета уставок ТЗНП электрических сетей среднего напряжения значения коэффициента, учитывающие влияние электромагнитных переходных процессов на функционирование защиты при дуговых прерывистых ОЗЗ, завышены, что приводит к значительному снижению чувствительности при устойчивых замыканиях и ограничению области применения ТЗНП.

2. Значения коэффициента $K_{пер}$ для различных исполнений ТЗНП могут быть уменьшены в 1,5–3,0 раза (табл. 2).

3. Наиболее тяжелые условия с точки зрения несрабатываний ТЗНП при внешних дуговых перемежающихся ОЗЗ имеют место в кабельных сетях напряжением 6 кВ, работающих с изолированной нейтралью, при возникновении повреждения на шинах для линий максимально возможной длины, выполненных кабелем наибольшего сечения.

4. С увеличением номинального напряжения $U_{ном}$ электрической сети при одном и том же максимальном собственном емкостном токе $I_{с собс}$ максимальная длина защищаемой линии уменьшается, а отстроенность защиты от внешних ОЗЗ увеличивается.

5. Поведение ТЗНП с ИОТ, выполненными на электромеханической элементной базе (например, реле типа РТ-40), при дуговых прерывистых ОЗЗ определяется в основном эффективным значением переходного тока, которое достигает наибольших значений при повреждениях, протекающих по модели Петерсена.

6. Влияние переходных процессов на работу ИОТ на электромеханической элементной базе уменьшается с увеличением входного сопротивления реле Z_p (например, реле РТ-40/0,2 и РТ-40/0,6 (табл. 2), что объясняется шунтирующим влиянием ветви намагничивания ТТНП.

7. С увеличением частоты свободных составляющих переходного тока $3i_0$ шунтирующее влияние ветви намагничивания ТТНП на работу ТЗНП с ИОТ, выполненными на электромеханической базе, увеличивается, а

влияние переходных токов на работу ТЗНП, соответственно, уменьшается. Поэтому для ТЗНП с ИОТ на электромеханической элементной базе, применяемых на кабельных линиях малой протяженности – порядка десятков и сотен метров (например, в сетях 6 кВ собственных нужд электростанций, в системах электроснабжения предприятий), значение $K_{пер}$ в (1) можно уменьшить.

8. Поведение ТЗНП, выполненной с использованием ИОТ на электронной базе (реле РТЗ-50), при дуговых прерывистых ОЗЗ определяется в основном временем затухания свободных составляющих тока переходного процесса при пробое изоляции и амплитудой переходного тока.

9. Наиболее эффективную отстройку от влияния переходных процессов при внешних дуговых перемежающихся ОЗЗ обеспечивают ИОТ ТЗНП, имеющие ограничение амплитуды входных сигналов во вторичных цепях реле при входных токах, превышающих $I_{с.р.}$, и отстройку по времени срабатывания, превышающую время существования свободных составляющих переходного тока $3i_0$ (например, реле РТЗ-51).

10. В электрических сетях, работающих с высокоомным заземлением нейтрали через резистор или с резонансным заземлением нейтрали через ДГР, амплитуда переходного тока при повторных пробоях не увеличивается. Для таких сетей значение $K_{пер}$ в (1) может быть принято равным 1.

11. С увеличением отстроенности от внешних дуговых прерывистых ОЗЗ эффективность функционирования ТЗНП при внутренних дуговых прерывистых повреждениях уменьшается. Практически все исполнения ТЗНП в этих режимах неработоспособны.

Заключение

На основе проведенных методом физико-математического моделирования исследований показано, что значения коэффициента $K_{пер}$, учитывающего влияние на функционирование ТЗНП электромагнитных переходных процессов при внешних дуговых прерывистых ОЗЗ, могут быть уменьшены в 1,5–3,0 раза, по сравнению с рекомендуемыми существующими методиками

расчета уставок, что позволяет увеличить чувствительность защиты при устойчивых замыканиях и расширить область ее применения.

Разработанные методика и банк тестовых сигналов могут быть применены не только для исследования динамических режимов функционирования существующих исполнений ТЗНП, но и для обоснования наиболее эффективных алгоритмов обработки входных сигналов в микропроцессорных защитах от этого вида повреждений.

Физико-математическое имитационное моделирование функционирования может быть использовано также для исследования и оценки эффективности функционирования при дуговых перемежающихся повреждениях токовых направленных защит от ОЗЗ, а также защит, основанных на использовании электрических величин непромышленной частоты (выс-

ших гармоник, токов и напряжений переходного процесса при ОЗЗ, «наложенных» токов).

Список литературы

1. Шалыт Г.М. Повышение эффективности профилактики изоляции в кабельных сетях // Тр. ВНИИЭ. Вып. 8. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – С. 77–97.
2. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971.
3. Шуцкий В.И., Жидков В.О., Ильин Ю.Н. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
4. Дударев Л.Е., Запороженко С.И., Лукьянцев Н.М. Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях // Электрические станции. – 1971. – № 8. – С. 64–66.
5. Сирота И.М. Защита от замыканий на землю в электрических сетях. – Киев: Изд-во АН УССР, 1955.
6. Шабад М.А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6–35 кВ. – СПб.: ПЭИПК, 2000.
7. Корогодский В.А., Кужеков С.Л., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. – М.: Энергоатомиздат, 1987.

Шуин Владимир Александрович,
Ивановский государственный энергетический университет,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой автоматического управления электроэнергетическими системами,
e-mail: shuin@rza.ispu.ru

Сарбеева Ольга Александровна,
Ивановский государственный энергетический университет,
магистрант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
e-mail: sarbееva_olga@mail.ru

Чугрова Елена Сергеевна,
Ивановский государственный энергетический университет,
магистрант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
e-mail: e_chugrova@mail.ru