

**Авторы:**  
**Пашковский С.Н.,**  
**Понамарев Е.А.**  
 ООО НПП «ЭКРА»,  
 г. Чебоксары, Россия

УДК 621.311.001.57

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПЕРЕМЕЖАЮЩИХСЯ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ

**Аннотация:** в статье рассмотрен метод математического моделирования процессов, протекающих в электроустановках среднего напряжения при перемежающихся дуговых замыканиях. Полученная в результате модель может быть использована при разработке защит от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ).

**Ключевые слова:** однофазные замыкания на землю, математическое моделирование, перемежающиеся дуговые замыкания.



**Пашковский**  
**Сергей Николаевич**

Дата рождения 07.12.1983 г.;  
 В 2006 г. окончил Оренбургский государственный университет, кафедра Электропитания промышленных предприятий;  
 В 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию в Новосибирском государственном техническом университете.  
 Тема диссертации: «Исследование и разработка защиты от замыканий на землю в электрических сетях с комбинированным заземлением нейтрали»;  
 ведущий инженер отдела защит низкого напряжения ООО НПП «ЭКРА»;

Несмотря на большое количество работ, направленных на создание защиты от замыканий на землю, в электрических сетях среднего напряжения эта задача до сих пор является актуальной. В частности, пока нет устройства защиты, удовлетворяющего условию массового применения в электрических распределительных кабельных сетях 6-10 кВ городов и промышленных предприятий, которые являются наиболее распространенными. Предложения по решению проблемы обеспечения селективной защиты от замыканий на землю в таких сетях за счет изменения режима заземления нейтрали, а именно перехода от компенсации емкостного тока к низкоомному резистивному заземлению с током замыкания в несколько сот ампер, по нашему мнению, являются дискуссионными, т.к. они не только не решают эту проблему, но и являются уходом от нее.

Однофазные замыкания на землю являются преобладающим видом повреждений в электрических сетях 6-35 кВ. Наиболее опасной разновидностью ОЗЗ являются дуговые перемежающиеся замыкания, так как помимо термического воздействия дуги они сопровождаются перенапряжениями, повышающими вероятность перехода однофазного замыкания в двойное замыкание на землю или междуфазное короткое замыкание.

Замыкания через перемежающуюся дугу являются наиболее тяжелым и труднораспознаваемым видом повреждения для релейной защиты с точки зрения ее селективной работы. Причем наибольшие проблемы с выполнением селективной и устойчиво функционирующей защиты от замыканий на землю возникают в электрических сетях с компенсацией емкостного тока. В связи с этим является актуальным совершенствование существующих алгоритмов работы защит от замыканий на землю для повышения эффективности их функционирования при наиболее опасных дуговых перемежающихся замыканиях.

При разработке защит от ОЗЗ наиболее предпочтительным вариантом выяснения реальной картины процессов, происходящих при замыканиях на землю, является метод математического моделирования. Метод физического моделирования и проведение натурных испытаний целесообразно применять главным образом в целях проверки и настройки уже созданных образцов защиты от замыканий на землю.

Математическое моделирование, благодаря непрерывному расширению возможностей современной вычислительной техники, получило в последние десятилетия ускоренное развитие и, как следствие, широкое внедрение в научно-проектных институтах и лабораториях. К достоинствам математического моделирования следует отнести его гибкость (быстрая смена параметров сети, сохранение и многократное использование любых характеристик цепей и переходных процессов, передача их на печать), а также возможность проведения вероятностно-статистических исследований. Однако, при всех возможностях современной вычислительной техники, исходные данные, необходимые для загрузки в элементы математической модели на основе полной схемы замещения сети, получить весьма затруднительно. Поэтому, исходные данные для загрузки в математическую модель целесообразно и правомерно принимать из ряда работ [1, 2, 3], в которых ранее проводились исследования переходных процессов при естественных замыканиях в существующих электрических сетях либо путем проведения искусственного замыкания фазы на землю.

На сегодняшний день известны три основные теории, описывающие переходные процессы в электрических сетях среднего напряжения при однофазном замыкании на землю. Это теории Петерсена, Петерса и Слепяна и теория Белякова [1, 2]. Также накоплено достаточно много данных по результатам исследования замыканий на землю в су-



**Понамарев  
Евгений Алексеевич**

Дата рождения 06.08.1984 г.;  
В 2006 г. окончил Оренбургский государственный университет, кафедра Электро-снабжения промышленных предприятий;  
В 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию в Томском политехническом университете. Тема диссертации: «Совершенствование защиты от замыканий на землю в обмотке статора гидрогенераторов укрупненного блока»;  
ведущий инженер технического отдела  
ООО НПП «ЭКРА»;

существующих сетях (имеется множество осциллограмм). Все эти данные, а также сильно развитый математический аппарат позволяют создать математическую модель, которая с достаточной точностью воспроизводит процессы, происходящие в электроустановках при дуговых перемежающихся замыканиях.

В настоящее время для решения задач математического моделирования в электроэнергетике существует достаточно много программных комплексов различной направленности, таких как MathCad, MATLAB, ElectronicsWorkbench, Mustang и др.

Наиболее подходящей для решения поставленной задачи, по мнению авторов, является система MATLAB [4]. Система содержит пакет Simulink, предназначенный для моделирования динамических систем, модели которых состояются из отдельных блоков (компонентов). Задание параметров элементов электрической схемы модели проводится через их расчет с использованием таких общепринятых характеристик электрической сети, как: суммарный емкостной ток, расстройка компенсации, коэффициент демпфирования, а также характеристик переходного процесса: частоты тока разряда емкости поврежденной фазы и дозаряда емкостей неповрежденных фаз и коэффициентов затухания этих токов. Для определения возможного диапазона изменения всех упомянутых факторов, влияющих на процесс дугового перемежающегося замыкания, были использованы данные, полученные в реальных сетях [2].

Процессы при дуговом замыкании моделируются на основе представления дугового промежутка идеальным ключом, который должен управляться по следующему алгоритму [5]:

1. ключ замыкается при достижении заданного пробивного напряжения на поврежденной фазе;
2. погасание дуги происходит при одном из задаваемых в расчете переходов тока в месте замыкания через значение, близкое к нулю;
3. для учета изменения электрической прочности дугового промежутка после погасания дуги в модели должна быть предусмотрена возможность задания изменения пробивного напряжения за время между двумя пробоями.

На рис. 1 представлена обобщенная блок-схема модели дугового промежутка. Функционально модель состоит из двух взаимосвязанных блоков, включающих в себя измерительно-управляющую цепь, представленную на рисунке блоком управления, и силовую цепь, состоящую из блока коммутации силовой цепи, посредством которого имитируется дуговое замыкание.

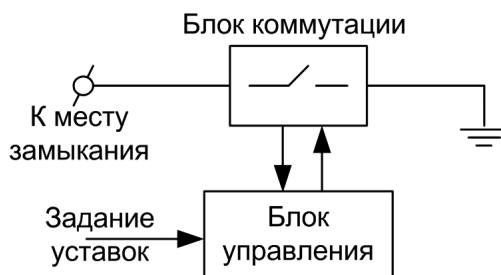


Рис. 1. Функциональная блок-схема модели дугового промежутка

Блок управления контролирует напряжение в месте предполагаемого замыкания и сравнивает его с заданным начальным значением пробивного напряжения. В случае если напряжение в месте подключения модели достигает величины пробивного, блок управления формирует сигнал на замыкание ключа блока коммутации, что приводит к появлению режима ОЗЗ. При снятии этого сигнала ключ размыкается и происходит восстановление нормального режима работы. Длительность сигнала, в течение которого существует ОЗЗ (ключ замкнут), задается в модели блока управления, что позволяет моделировать процессы согласно различным теориям протекания перемежающихся однофазных дуговых замыканий.

Следует обратить внимание на то, что согласно классическим теориям дуговых замыканий, погасание дуги происходит при одном из переходов тока в месте замыкания через значение, близкое к нулю. Рассчитывать этот момент довольно затруднительно, т.к. в общем случае ток в месте замыкания имеет многочастотный характер [2]. В связи с этим алгоритм управления ключом дополнен вторым сигналом: после снятия первого сигнала ключ остается замкнут до того момента, пока ток, протекающий через него, не снизится ниже заданной уставки, близкой к нулю. Тем самым выбор длительности первого сигнала значительно упрощается.

Для реализации алгоритма восстановления электрической прочности дугового промежутка после погасания дуги блок управления содержит модуль, который непрерывно рассчитывает текущее значение пробивного напряжения (электрической прочности дугового промежутка) и отправляет его в модуль сравнения, описанный выше. Закон нараста-

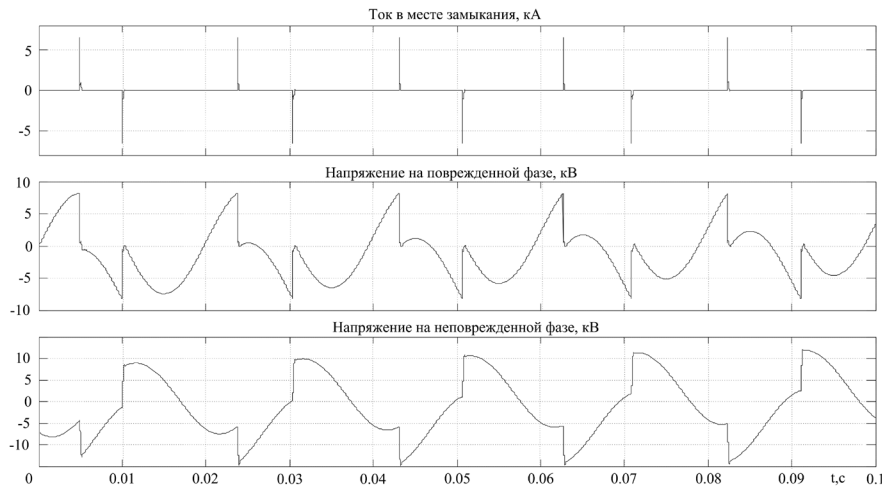


Рис. 2. Осциллограммы переходных процессов в сети среднего напряжения, работающей с изолированной нейтралью,  $U_{np}=0,9U_{\phi m}$

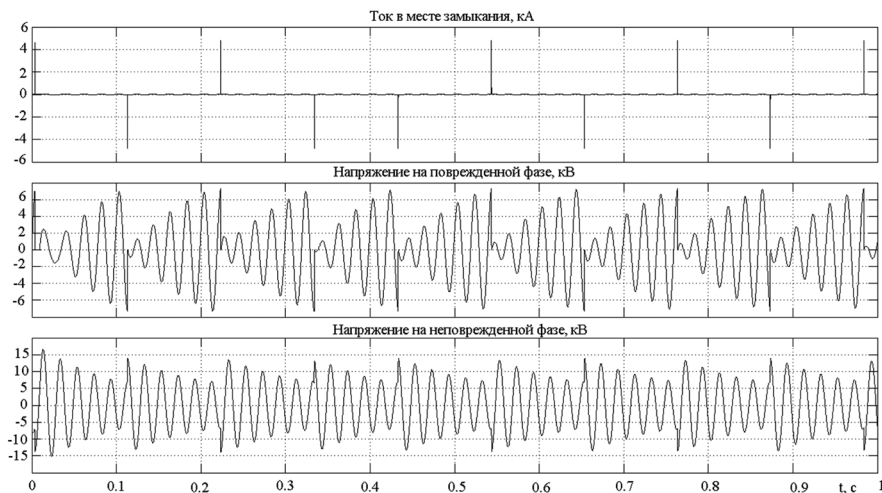


Рис. 3. Осциллограммы переходных процессов в сети среднего напряжения, работающей с резонансно-заземленной нейтралью при расстройке компенсации  $\nu = 5\%$ ,  $U_{np}=0,9U_{\phi m}$ ,  $d=0,05$

ния электрической прочности дугового промежутка описывается следующим уравнением [6]:

$$U_{np} = U_{нач} + \Delta U \cdot (1 - e^{-(t-t_{но})/T_a}),$$

где  $U_{нач}$  – начальное напряжение на дуговом промежутке после погасания дуги, кВ;

$\Delta U$  – величина приращения пробивного напряжения, кВ;

$T_a$  – постоянная времени восстановления пробивного напряжения, с;

$t$  – текущее время, с;

$t_{но}$  – время момента очередного погасания дуги, с.

В зависимости от типа электроустановки, на которой планируется проводить расчетные эксперименты,  $U_{нач}$  может изменяться от пробоя к пробую. Увеличение  $U_{нач}$  соответствует восстановлению диэлектрических свойств дугового промежутка, а уменьшение – его деградации.

Для иллюстрации функционирования разработанного алгоритма, на рис. 2 и рис. 3 приведены осциллограммы, полученные на модели сети среднего напряжения.

Разработанная таким образом модель, воспроизводящая процессы при перемежающихся дуговых замыканиях, дает расчетные результаты, хорошо согласующиеся с известной картиной переходных процессов, имеющих место в реальных электроустановках. Поэтому данная модель может использоваться для решения задач разработки и усовершенствования защит от замыкания на землю.

Развитие данного способа авторы видят в применении так называемого физико-математического моделирования, которое интенсивно развивается в последние годы [7]. Метод основан на получении осциллограмм в математической модели, записи их в файл и дальнейшем воспроизведении с помощью программно-технических средств в реальном времени. Данный метод позволяет тестировать как разрабатываемые, так и уже разработанные устройства защиты от ОЗЗ. Требованием к программно-техническому комплексу является возможность воспроизведения сигналов с частотами до 20 кГц без существенной потери информации с достаточной мощностью выходного сигнала для подачи на испытуемое устройство.

Литература:

1. Вильгейм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 414 с.
2. Лихачев Ф.А. Замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
3. Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М. Режимы нейтрали электрических сетей. – Киев.: Наукова думка, 1985. – 264 с.
4. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
5. Пашковский С.Н., Понамарев Е.А. Моделирование процессов в электрических сетях при перемежающихся дуговых замыканиях / Томский политехнический университет. – Томск, 2007. – 20 с. – Деп. в ВИНТИ 28.09.2007 № 927–В2007.
6. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутациях электрических сетей. – М.: Высшая школа, 1967. – 195 с.
7. Шуин В.А. Физико-математическое моделирование динамических режимов функционирования токовых защит от замыканий на землю / Шуин В.А., Сарбеева (Добрягина) О.А., Чугрова Е.С. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика – XVI МНТК студентов и аспирантов: Тез. докл. в 3-х т. Т.3. М.: Изд. МЭИ, 2010. – С.515–516.