

УДК 621.311.014

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 10 кВ**

Ю.Н. Веприк, С.Н. Лебедка*

*Национальный технический университет «Харьковский
политехнический институт» г. Харьков;*

**Сумский государственный университет, г. Сумы*

Проведены вычислительные эксперименты по исследованию длительных электромагнитных переходных процессов, сопровождающих однофазные замыкания на землю в воздушных электрических сетях напряжением 10 кВ. Воспроизведена картина протекающих процессов, позволяющая определить величины перенапряжений и бросков тока при замыкании фазы на землю, повторном зажигании и гашении дуги, горячей в месте замыкания. Исследованы факторы, влияющие на величины перенапряжений и бросков тока.

ВВЕДЕНИЕ

Физические явления, связанные с дуговыми замыканиями в электрических сетях, и процессы, происходящие при перемежающихся однофазных замыканиях на землю, сложны, поэтому попытки получить их аналитическое описание, начиная с классических работ [1, 2, 3], реализованы лишь для простых схем и после отказа от учета целого ряда влияющих факторов. Возможности экспериментальных исследований также ограничены и данные по количественным характеристикам переходных процессов при повреждениях в реальных сетях приводятся, как правило, по результатам либо анализа опыта эксплуатации действующих электроэнергетических систем, либо автоматической регистрации перенапряжений в действующих сетях [4]. Однако анализ опыта эксплуатации действующих энергосистем позволяет установить лишь факт наличия перенапряжений, превышающих электрическую прочность изоляции.

Проведением длительной автоматической регистрации перенапряжений можно было бы получить наиболее точный ответ на вопрос о том, на какие статистические характеристики внутренних перенапряжений должна быть выбрана изоляция серийного оборудования, предназначенного для работы в типовых схемах с учетом одновременного действия совокупности всех факторов, влияющих на развитие перенапряжений [5]. Однако, во-первых, средств регистрации в электрических сетях напряжением 6-35 кВ в настоящее время недостаточно, а, во-вторых, на получение нужных результатов требуется слишком много времени.

Более широкие возможности для выяснения как качественной картины, так и количественных характеристик переходных процессов обеспечиваются на пути разработки возможно более полных математических моделей и проведения вычислительных экспериментов. Поэтому в последние годы получают все более широкое распространение исследования переходных процессов и перенапряжений с использованием современной вычислительной техники, хотя и переход к решению задач определения характеристик перенапряжений на ЭВМ не снимает полностью всех технических трудностей.

Целью статьи является проведение вычислительных экспериментов с применением реализованной на ЭВМ в среде разработки Delphi математической модели электрической сети [6]. Необходимо исследовать длительные электромагнитные переходные процессы, возникающие в воздушных линиях напряжением 10 кВ при однофазных замыканиях на землю, определить основные параметры протекающих процессов. Варьируя в расчетах различные характеристики электрических сетей, необходимо оценить степень их влияния на характер протекания и количественные величины параметров электромагнитных переходных процессов.

1 ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования принят участок распределительной электрической сети напряжением 10 кВ АК “Харьковоблэнерго”. Расчетный участок сети принят на основании реального состояния схемы сети и содержит в качестве источника питания подстанцию 110/35 кВ “Слатино”, подстанцию 35/10 кВ “Прудянка”, ряд воздушных линий 35, 10 кВ и узлы нагрузки сети 10 кВ. Число включенных под нагрузку силовых трансформаторов в узлах схемы, положение секционных выключателей и разъединителей соответствуют реальной схеме.

В качестве расчетной принята схема, представленная на рис. 1. Схема содержит 9 узлов нагрузки и 8 ветвей. В качестве узлов в расчетной схеме приняты нагрузки сети 10 кВ.

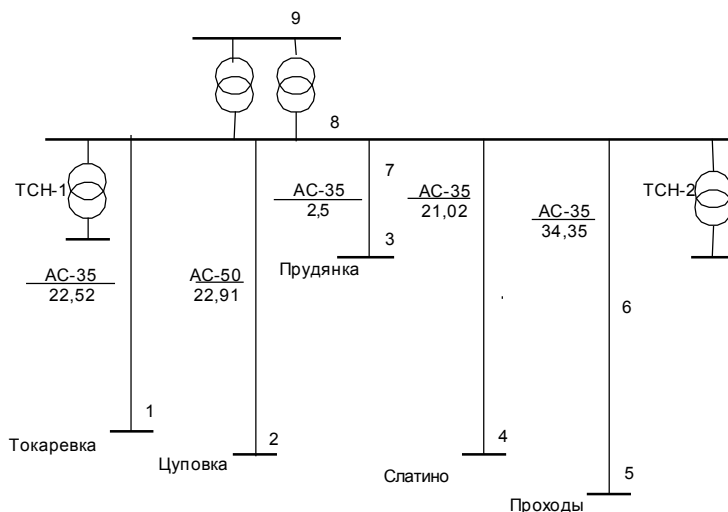


Рисунок 1 – Расчетная схема электрической сети

Параметры основного оборудования электрической сети и нагрузки подстанций приведены в табл. 1 и 2. Воздушные линии выполнены на железобетонных опорах, среднегеометрическое расстояние между проводами линий напряжением 10 кВ – 2 м.

Таблица 1 – Параметры ВЛ

	Название	Марка, сечение	Длина, км	R, Ом	X, Ом	B, См	Номера узлов
1	Токаревка	АС-35	22,52	20,75	9,25	71,3	1-8
2	Цуповка	АС-50	22,91	14,66	9,16	72,5	2-8
3	Прудянка	АС-35	2,5	2,3	1,02	7,60	3-8
4	Слатино	АС-35	21,02	19,34	8,62	66,5	4-8
5	Проходы	АС-35	34,35	34,6	14,1	108,8	5-8

Таблица 2 – Нагрузки узлов сети

	Название	I, А	S, МВА	P+jQ, МВт, МВар	Номера узлов
1	Токаревка	5,0	0,087	0,007+j0,003	1
2	Цуповка	40,0	0,692	0,55+j0,27	2
3	Прудянка	10,0	0,173	0,14+j0,07	3
4	Слатино	55,0	0,950	0,76+j0,38	4
5	Проходы	45,0	0,780	0,62+j0,31	5

Проведены расчеты по моделированию однофазных замыканий на землю на воздушной линии “Прудянка” в 100 м от шин подстанции “Прудянка” (узел № 7).

Исследования электромагнитных переходных процессов выполнены с применением программы AnFaz [7].

Разработанная математическая модель электрических систем на основе уравнений в фазных координатах и неявных методов численного интегрирования дифференциальных уравнений имеет модульную структуру и содержит как статические элементы, так и вращающиеся электрические машины. Кроме того, в математических моделях силовых трансформаторов предусмотрена возможность задания схемы соединения обмоток (“звезда”, “треугольник”) и режима работы нейтрали (изолированная, заземленная глухо или через сопротивление). Поэтому модель охватывает достаточно широкий круг объектов и задач и применима для исследований электромагнитных и электромеханических переходных процессов в системах с изолированной и глухозаземленной нейтралью.

Файл исходных данных для расчетов программой AnFaz содержит следующие данные:

- по воздушным линиям электропередачи – длины линий, сечения и удельные активные сопротивления проводов, координаты точек подвеса проводов на опорах;
- по силовым трансформаторам – номинальные мощность и напряжения обмоток, потери и ток холостого хода, потери и напряжения короткого замыкания, схемы соединения обмоток;
- по узлам нагрузок – номинальные напряжения и мощности, потребляемые и генерируемые в узле.

По этим данным выполняется расчет параметров элементов сети в фазных координатах, формируются дискретные модели элементов, составляется и решается система дифференциальных уравнений всей сети в целом, определяются мгновенные значения токов и напряжений фаз всех элементов в течение переходного процесса при заданном виде и месте коммутации. Расчеты переходных процессов выполнены с шагом численного интегрирования 0,01 мс.

Для выяснения основных влияющих факторов, а также степени их влияния на характер протекания и количественные характеристики переходных процессов в расчетах варьировались:

- момент (фаза напряжения) возникновения однофазных замыканий на землю;
- вид замыкания (металлическое, через дугу, перемежающееся);
- сопротивление дуги замыкания на землю;
- сопротивление изоляции;
- длительности замыкания на землю и промежутки времени между повторными замыканиями.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 10 кВ

При металлическом замыкании фазы на землю варьировались фаза напряжения в момент возникновения замыкания, сопротивление изоляции нейтрали электроприемников (от 10 кОм до 20 МОм), сопротивление в точке замыкания (от 0,001 Ом до 0,01 Ом).

Кривые изменения токов и напряжений в элементах сети (цифрограммы), иллюстрирующие основные из полученных результатов, представлены на рис. 2–3 (напряжения показаны в кВ, токи – в кА).

При повторяющихся металлических ОЗЗ (рис 4–5) варьировались сопротивление изоляции и сопротивление в точке замыкания.

При моделировании перемежающихся однофазных замыканий на землю варьировались сопротивление дуги (от 0,01 до 10 Ом), сопротивление изоляции, количество повторных зажигания, промежутки между повторными зажиганиями и длительности замыканий. Цифрограммы протекающих процессов показаны на рис. 6–9.

Анализ приведенных цифрограмм позволяет сделать ряд выводов.

При металлических однофазных замыканиях на землю наиболее существенно на уровне перенапряжений и емкостных токов на землю влияние начальной фазы напряжения – чем ближе к амплитудному значению напряжение поврежденной фазы к моменту замыкания на землю, тем выше перенапряжения в сети и емкостный ток в месте однофазного замыкания на землю.

При повторяющихся металлических однофазных замыканиях на землю скорость разряда емкостей фаз и междуфазных тем медленнее, чем выше сопротивление изоляции.

При перемежающихся замыканиях на землю длительность промежутков между повторными замыканиями влияет на перенапряжения в сети только при малых сопротивлениях изоляции (из-за быстрого разряда емкостей фаз). При больших сопротивлениях изоляции разряд емкостей фаз происходит медленно, поэтому длительность промежутков между повторными зажиганиями дуги практически не имеет значения.

С уменьшением сопротивления дуги увеличиваются емкостные токи замыканий на землю и перенапряжения в сети. При повторных зажиганиях дуги перенапряжения с каждым новым замыканием сначала увеличиваются, затем (после 3-4 зажигания) стабилизируются. Следует также отметить, что по мере удаления от точки замыкания и от источника питания перенапряжения в сети увеличиваются (в исследуемой сети – от 17–18 кВ в узле 7 до 32-35 кВ в узле 5).

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применяя систему фазных координат и используя неявные методы численного интегрирования дифференциальных уравнений была получена математическая модель электрической сети 6–35 кВ.

Выполненные вычислительные эксперименты показали, что принятая модель позволяет достаточно полно и достоверно отразить действительную картину физических процессов, сопровождающих электромагнитные переходные процессы в электрических сетях с изолированной нейтралью.

Применение разработанной модели возможно также для анализа эффективности средств компенсации емкостных токов и ограничения перенапряжений в таких сетях при однофазных замыканиях на землю.

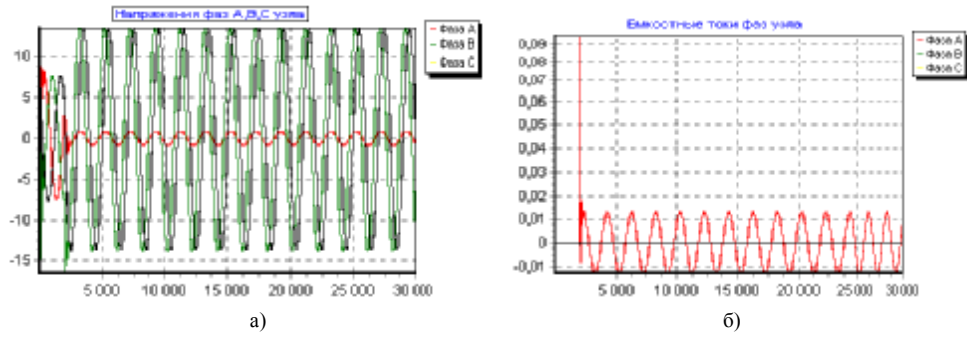


Рисунок 2 – Переходный процесс при $R_K = 0,001 \text{ Ом}$, $R_{U3} = 10 \text{ кОм}$
(а – узел 5, б – узел 7)

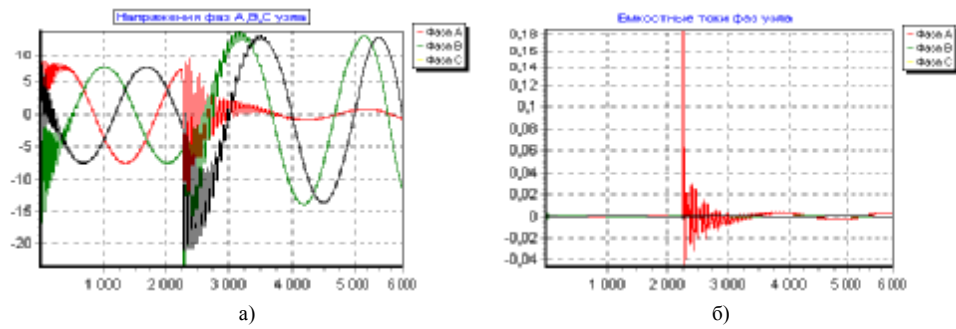


Рисунок 3 – Переходный процесс при $R_K = 0,01 \text{ Ом}$, $R_{U3} = 1 \text{ МОм}$ при ОЗЗ в момент U_{max}
(а – узел 5, б – узел 7)

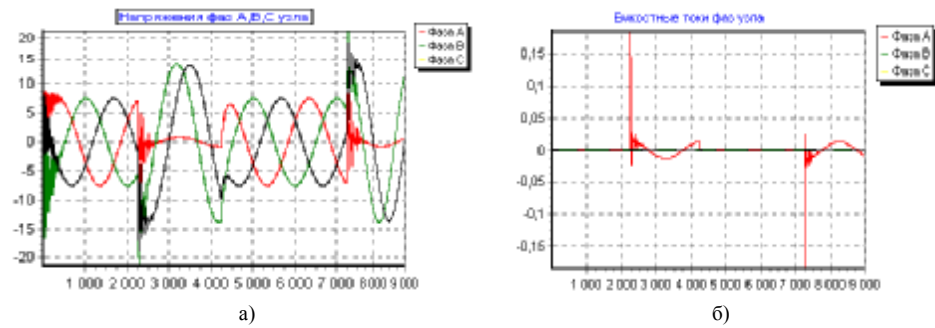


Рисунок 4 – Переходный процесс при $R_K = 0,01 \text{ Ом}$, $R_{U3} = 10 \text{ кОм}$
(а – узел 5, б – узел 7)

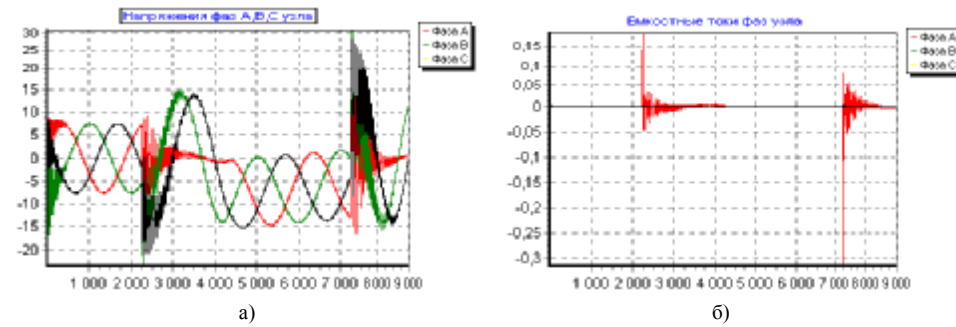


Рисунок 5 – Переходный процесс при $R_K = 0,001 \text{ Ом}$, $R_{U3} = 1 \text{ МОм}$
(а – узел 5, б – узел 7)

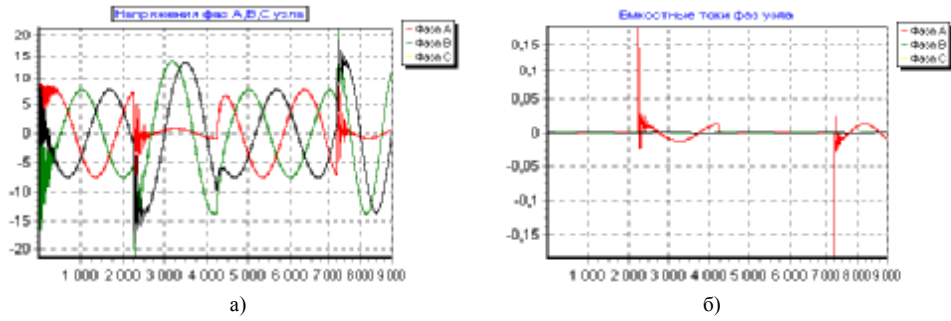


Рисунок 6 – Переходный процесс при $R_K = 0,01 \text{ Ом}$, $R_{из} = 1 \text{ кОм}$
(а – узел 5, б – узел 7)

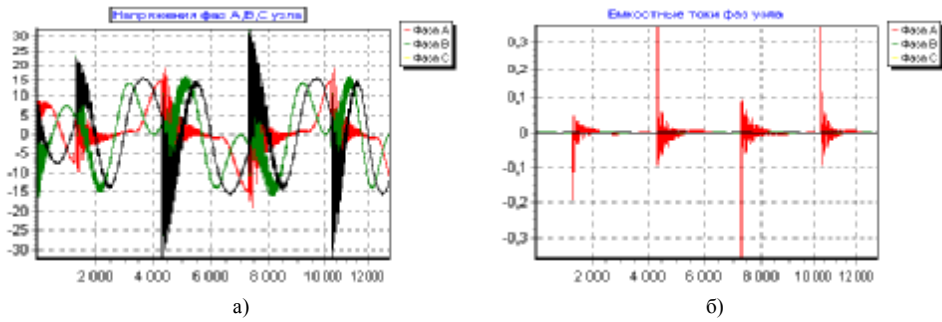


Рисунок 7 – Переходный процесс при $R_K = 0,01 \text{ Ом}$, $R_{из} = 1 \text{ МОм}$
(а – узел 5, б – узел 7)

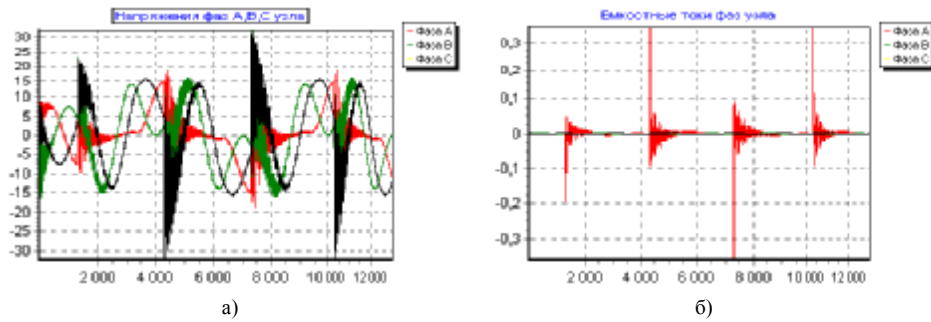


Рисунок 8 – Переходный процесс при $R_K = 0,1 \text{ Ом}$, $R_{из} = 1 \text{ МОм}$
(а – узел 5, б – узел 7)

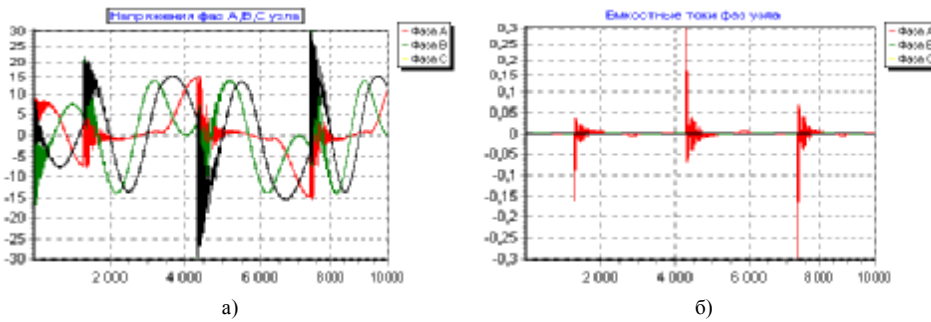


Рисунок 9 – Переходный процесс при $R_K = 10 \text{ Ом}$, $R_{из} = 1 \text{ МОм}$
(а – узел 5, б – узел 7)

SUMMARY

RESEARCH OF LONG ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS IN ELECTRIC NETWORKS 10 kV

Ju.N. Veprik

*National Technical University "Kharkov Polytechnical Institute",
Frunze Str., 21, Kharkov, 61002*

S.N. Lebedka

Sumy State University, R-Korsakova Str., 2, Sumy, 40007

Computing experiments on research of the long electromagnetic transients accompanying single-phase short circuits on the ground in air electric networks by a voltage 10 kV carried out. The picture of the proceeding processes is reproduced, allowing defining sizes of overvoltage and throws of a current at short circuit of a phase on the ground, repeated ignition and clearing of the arch burning in a place of short circuit. The factors influencing sizes overvoltage and throws of a current are investigated.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джуварлы Ч.М. К теории перенапряжений от заземляющих дуг в сети с изолированной нейтралью // Электричество. – 1953. – № 6. – С. 18-27.
2. Беляков Н.Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью // Электричество. – 1957. – № 5. – С. 31-36.
3. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
4. Зархи И.М., Мешков В.Н., Халилов Ф.Х. Внутренние перенапряжения в сетях 6-35кВ. – Л.: Наука, 1986. – 128 с.
5. Половой И.Ф., Михайлов Ю.А., Халилов Ф.Х. Внутренние перенапряжения на электрооборудовании высокого и сверхвысокого напряжения. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 152 с.
6. Лебедка С.Н., Веприк Ю.Н. Дискретные модели элементов электрической сети, полученные с использованием формулы второго порядка неявного метода Гира // Вестник НТУ "ХПИ". – 2004. – № 22. – С. 21-26.
7. Веприк Ю.Н., Лебедка С.Н., Веприк В.Ю. Исследование электромагнитных переходных процессов в кабельных сетях 6 кВ при однофазных замыканиях на землю // Энергетика и электрификация. – 2005. – № 5. С. 23-26.

Веприк Ю.Н., кандидат тех. наук, профессор,
НТУ "ХПИ", г. Харьков
Лебедка С.Н. ассистент, СумГУ, г. Сумы

Поступила в редакцию 20 октября 2007 г.