

DOI.org/10.5281/zenodo.1408246  
УДК 621.316

А.М. Ершов, А.В. Хлопова, А.И. Сидоров

ЕРШОВ АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ – к.т.н., доцент, e-mail: a.m.ershov@mail.ru  
ХЛОПОВА АННА ВЛАДИМИРОВНА – ассистент, e-mail: annienergo@mail.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-8048-6148>

Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

СИДОРОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой  
«Безопасность жизнедеятельности», e-mail: bgd-susu@mail.ru

*Южно-Уральский государственный университет*  
*(Национальный исследовательский университет)*  
Проспект Ленина, 76, Челябинск, 454080

## Моделирование системы обеспечения электробезопасности при обрыве одной из фаз

**Аннотация:** Обрывы проводов воздушных линий электропередачи напряжением 10 кВ вызывают снижение качества получаемой потребителями электрической энергии, создают пожароопасные ситуации в зоне повреждения воздушной линии, увеличивают вероятность попадания человека под высокое напряжение, что в большинстве случаев приводит к летальному исходу. В настоящее время в практике эксплуатации электрических сетей отсутствуют устройства своевременного отключения электрической сети при наличии в ней обрыва провода воздушной линии 10 кВ. Для построения защиты, обеспечивающей электробезопасность при обрыве провода, в качестве информационного параметра используют напряжения обратной и нулевой последовательностей, а само устройство защиты устанавливают либо в конце воздушной линии 10 кВ, либо на стороне низшего напряжения понижающего трансформатора 10/0,4 кВ. Для выбора информационного параметра, получения его количественных характеристик и определения места установки защиты проведены исследования напряжений с использованием компьютерного моделирования в программной среде MATLAB и физического моделирования в лабораторных условиях. В статье приводятся результаты исследований напряжений обратной и нулевой последовательности в различных точках электрической сети напряжением 10/0,38 кВ с трансформатором со схемой соединения обмоток «треугольник–звезда с нулем» при обрыве фазного провода воздушной линии напряжением 10 кВ. Показано, что напряжение обратной последовательности более полно характеризует обрыв фазного провода воздушной линии напряжением 10 кВ, чем напряжение нулевой последовательности, причем информация о напряжении обратной последовательности может быть получена как на стороне высшего, так и на стороне низшего напряжения понижающего трансформатора 10/0,4 кВ. Обосновывается установка устройства защиты на стороне низшего напряжения понижающего трансформатора 10/0,4 кВ. Определено значение уставки устройства защиты по напряжению обратной последовательности. Проводится сопоставление результатов исследования с результатами, полученными ранее при исследовании напря-

© Ершов А.М., Хлопова А.В., Сидоров А.И., 2018

О статье: поступила 28.04.2018; финансирование: бюджет Южно-Уральского гос. ун-та (Национально исследовательского университета).

жений в электрической сети с трансформатором со схемой соединения обмоток «звезда–звезда с нулем».

*Ключевые слова:* воздушная линия 10 кВ, обрыв провода, устройство защиты, напряжение обратной последовательности, напряжение нулевой последовательности, электробезопасность.

### Введение

Обрыв фазного провода воздушной линии электропередачи напряжением 10 кВ приводит не только к нарушению электроснабжения потребителей, но и создает электро- и пожароопасные ситуации [4].

Для построения защит и определения их уставок необходимо знать характеристики режимных параметров (напряжений или токов), которые позволяли бы четко идентифицировать нормальные и аварийные режимы работы электрических сетей напряжением 10/0,38 кВ, в частности обрыв фазного провода ВЛ-10 кВ.

В статье [5] рассмотрены изменения напряжений при обрыве фазного провода воздушной линии 10 кВ в электрической сети напряжением 10/0,38 кВ с трансформатором со схемой соединения обмоток «звезда–звезда с нулем». В данной статье проведены исследования изменений напряжений в различных точках электрической сети 10/0,38 кВ с трансформатором, имеющим схему соединения обмоток «треугольник–звезда с нулем», при обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ с целью получения качественных и количественных характеристик, которые могут быть использованы при разработке устройств защиты. Исследования проведены с учетом положений, изложенных в технической литературе [1, 2, 7–9, 10, 11].

### Методы исследования

Исследуемая электрическая сеть напряжением 10/0,38 кВ (рис. 1) состоит из источника питания напряжением 10 кВ, трехпроводной воздушной линии напряжением 10 кВ (ВЛ-10 кВ), понижающего трехфазного трансформатора Т напряжением 10/0,4 кВ со схемой соединения обмоток  $\Delta/Y_H$ , четырехпроводной воздушной линии напряжением 380 В (ВЛ-380 В) и нагрузки потребителей в конце линии  $P$ .

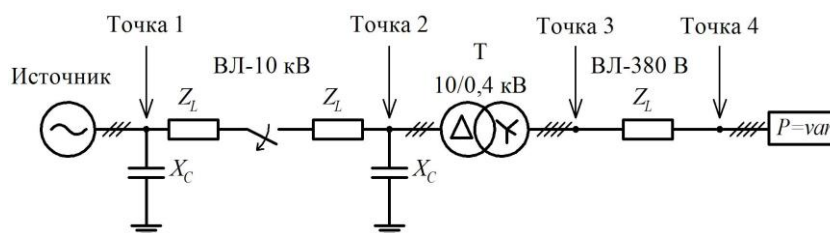


Рис. 1. Электрическая сеть напряжением 10/0,38 кВ.

Для исследования в качестве прототипа взята среднестатистическая электрическая сеть напряжением 10/0,38 кВ, состоящая из:

- ВЛ-10 кВ, длиной 10 км, выполненной проводом АС-70 мм<sup>2</sup>;
- понижающего трансформатора напряжением 10/0,4 кВ, мощностью 160 кВ·А со схемой и группой соединения обмоток  $\Delta/Y_H-11$ ;
- ВЛ-380 В, длиной 500 м, выполненной проводом АС-35 мм<sup>2</sup>;
- пофазно изменяемой нагрузки потребителей  $P$  мощностью 30 кВт, подключенной в конце линии.

На изменения напряжений нулевой  $U_0$  и обратной  $U_2$  последовательности в рассматриваемой электрической сети кроме обрыва фазного провода ВЛ-10 кВ существенное влияние оказывает несимметрия фазных нагрузок потребителей напряжением 380 В. Поэтому при

исследовании обрывов проводов ВЛ-10 кВ были учтены следующие четыре предельных варианта несимметрии нагрузки потребителей напряжением 380 В по фазам:

- $P_A = P_B = P_C = 100\%$  – симметричная фазная нагрузка;
- $P_A = 0\%$ ,  $P_B = P_C = 100\%$  – нагрузка отсутствует в фазе А;
- $P_A = P_B = 0\%$ ,  $P_C = 100\%$  – нагрузка отсутствует в двух фазах А и В;
- $P_A = P_B = P_C = 0\%$  – нагрузка отсутствует во всех фазах ВЛ-380 В – «холостой ход».

При исследованиях обрыв фазного провода производится последовательно в фазе А, затем В и С. Это обеспечивает все возможные сочетания фаз оборванного провода ВЛ-10 кВ с фазной несимметрией потребителей напряжением 380 В, поскольку наблюдается различие характеристик напряжений  $U_0$  и  $U_2$  на отстающей и опережающей фазах по отношению к фазе, в которой происходит обрыв фазного провода.

Таким образом, исследования изменения напряжений проведены для 16 режимов работы электрической сети 10/0,38 кВ:

- нормальный режим (НР) работы ВЛ-10 кВ при четырех вариантах нагрузки потребителей напряжением 380 В;
- поочередный обрыв провода фазы А, В или С ВЛ-10 кВ (ОФА, ОФВ, ОФС), причем каждый раз при четырех вариантах нагрузки потребителей напряжением 380 В.

Рассмотрим изменения напряжений в четырех характерных точках электрической сети (рис. 1) – по длине электрической сети 10/0,38 кВ:

- точка 1, со стороны источника, в начале ВЛ-10 кВ, до места обрыва фазного провода;
- точка 2, в конце ВЛ-10 кВ, после места обрыва фазного провода ВЛ-10 кВ;
- точка 3, на стороне низшего напряжения понижающего трансформатора, в начале ВЛ-380 В;
- точка 4, в конце ВЛ-380 В, на вводе электрической нагрузки.

Исследования проведены с использованием следующих технических инструментариев.

1. Компьютерное моделирование в программном комплексе MATLAB с использованием пакета Simulink [12]. Компьютерная модель (КМ) предоставляет широкие возможности для исследований. Она позволяет моделировать такие режимы, которые достаточно сложно организовать в реальной электрической сети и которые небезопасны для людей и животных, находящихся рядом с воздушной линией.

2. Физическое моделирование использовано для проверки достоверности исследований, проведенных на КМ. Для этого на кафедре «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Южно-Уральского государственного университета разработана физическая модель (ФМ) напряжением 380/177 В [6], в которой значительно уменьшены значения мощностей и токов, но благодаря использованию коэффициентов подобия могут быть воспроизведены практически все физические процессы действующей электрической сети [3]. При исследованиях на ФМ для измерения и фиксации напряжений и токов использован цифровой самопишущий измерительный прибор «Ресурс-2UF2M». Он позволяет записывать линейные и фазные напряжения, углы между векторами этих напряжений, напряжения обратной и нулевой последовательностей, токи, мощности и другие параметры, осредненные за определенные интервалы времени. Кроме того, имеется возможность синхронизации фиксации параметров при использовании в замерах нескольких приборов, устанавливаемых в разных точках обследуемой сети.

### Результаты исследований

В таблице представлены результаты исследований изменений напряжений нулевой  $U_0$  и обратной  $U_2$  последовательностей в четырех характерных точках электрической сети напряжением 10/0,38 кВ (рис. 1), полученные с помощью компьютерного моделирования. Напряжения представлены в относительных единицах (о. е.): напряжение нулевой последо-

вательности приведено к соответствующим фазным напряжениям, а напряжение обратной последовательности – к соответствующим линейным напряжениям, измеренным в четырех характерных точках при работе сети 10/0,38 кВ на холостом ходу, т.е. при отсутствии нагрузок потребителей, подключенных к ВЛ-380 В.

Проведем анализ изменения напряжений.

*Напряжение нулевой последовательности  $U_0$*

При нормальном режиме работы электрической сети 10/0,38 кВ:

- напряжение  $U_0$  в сети 10 кВ (в точках 1 и 2; режимы 1–4) равно нулю;
- напряжение  $U_0$  в сети 380 В (точки 3 и 4) при симметричной нагрузке и на «холостом ходу» ВЛ-380 В (режимы 1 и 4) равно нулю, а при наличии несимметрии нагрузки потребителей 380 В (режимы 2 и 3) составляет 0,2–14,7% фазного напряжения и обусловлено именно несимметрией фазных нагрузок потребителей напряжением 380 В.

**Изменения напряжений  $U_0$  и  $U_2$  (о. е.)  
в характерных точках электрической сети напряжением 10/0,38 кВ,  
полученные с помощью компьютерного моделирования**

Номер режима	Нагрузка по фазам, %			Точка 1		Точка 2		Точка 3		Точка 4	
	$P_A$	$P_B$	$P_C$	$U_0$	$U_2$	$U_0$	$U_2$	$U_0$	$U_2$	$U_0$	$U_2$
Нормальный режим работы ВЛ-10 кВ											
1	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	100	100	0	0	0	0,001	0,002	0,004	0,134	0,032
3	0	0	100	0	0	0	0,001	0,003	0,003	0,147	0,027
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Обрыв провода фазы А											
5	100	100	100	0,002	0	0,5	0,499	0	0,497	0	0,46
6	0	100	100	0,003	0	0,68	0,679	0,002	0,679	0,137	0,658
7	0	0	100	0,003	0	0,616	0,616	0	0,616	0,018	0,614
8	0	0	0	0,002	0	0,5	0,5	0	0,5	0	0,5
Обрыв провода фазы В											
9	100	100	100	0,002	0	0,5	0,499	0	0,497	0	0,46
10	0	100	100	0,002	0	0,481	0,48	0,002	0,478	0,137	0,458
11	0	0	100	0,002	0	0,5	0,499	0,003	0,498	0,147	0,474
12	0	0	0	0,002	0	0,5	0,5	0	0,5	0	0,5
Обрыв провода фазы С											
13	100	100	100	0,002	0	0,5	0,499	0	0,497	0	0,46
14	0	100	100	0,002	0	0,5	0,5	0,002	0,499	0,134	0,488
15	0	0	100	0,002	0	0,505	0,505	0	0,505	0,018	0,507
16	0	0	0	0,002	0	0,5	0,5	0	0,5	0	0,5

**При обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ:**

- напряжение  $U_0$  в сети 10 кВ (в точке 1; режимы 5–16) возрастает до 0,3% фазного напряжения. Это увеличение напряжения обусловлено возникновением неравенства емкостных проводимостей фаз сети относительно земли из-за обрыва фазного провода;
- напряжение  $U_0$  в сети 10 кВ (в точке 2; режимы 5 и 8, 9 и 12, 13 и 16) при симметричной нагрузке потребителей 380 В, а также «холостом ходе» ВЛ-380 В становится равным половине фазного напряжения сети. В остальных режимах (7 и 8, 10 и 11, 14 и 15) на про-

дольную несимметрию ВЛ-10 кВ накладывается несимметрия фазных нагрузок потребителей сети 380 В (вследствие искажения треугольников векторов линейных напряжений на стороне как низшего, так и высшего напряжения понижающего трансформатора [7, 9]), и, в зависимости от сочетания поврежденной фазы ВЛ-10 кВ и несимметрии фазных нагрузок,  $U_0$  изменяется в пределах 50–68% фазного напряжения;

– напряжение  $U_0$  в точках 3 и 4 при обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ не меняется – оно остается тем же, что и при нормальном режиме работы ВЛ-10 кВ. Это подтверждает теоретические положения [8, 10, 11], что напряжение  $U_0$  из сети 10 кВ, работающей с изолированной нейтралью, в сеть 380 В через понижающий трансформатор Т (рис. 1) не проходит, независимо от схем соединения обмоток этого трансформатора. Наличие небольшого напряжения  $U_0$  (в точке 4; режимы 6 и 7, 10 и 11, 14 и 15), равного 1,8–14,7% фазного напряжения, обусловлено несимметрией фазных нагрузок потребителей.

*Напряжение обратной последовательности  $U_2$*

**При нормальном режиме работы электрической сети 10/0,38 кВ:**

– напряжение  $U_2$  в сети 10 кВ (в точках 1 и 2; режимы 1–4) равно нулю – сеть симметричная;

– напряжение  $U_2$  в сети 380 В (в точках 3 и 4) при симметричной нагрузке и «холодном ходе» ВЛ-380 В (режимы 1 и 4) равно нулю, а при наличии несимметрии нагрузки потребителей 380 В (режимы 2 и 3) – изменяется в пределах 0,3–3,2% линейного напряжения и обусловлено именно несимметрией фазных нагрузок потребителей.

**При обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ:**

– напряжение  $U_2$  в сети 10 кВ (в точке 1; режимы 5–16) до места обрыва фазного провода остается равным нулю, поскольку ВЛ-10 кВ на участке до места обрыва работает в симметричном режиме;

– напряжение  $U_2$  в сети 10 кВ (в точке 2; режимы 5 и 8, 9 и 12, 13 и 16) после места обрыва фазного провода ВЛ-10 кВ при симметричной нагрузке потребителей 380 В, а также «холостом ходе» ВЛ-380 В становится равным половине линейного напряжения сети; при остальных режимах (6 и 7, 10 и 11, 14 и 15) из-за деформации треугольников линейных напряжений вследствие влияния несимметрии нагрузок потребителей 380 В напряжение  $U_2$  изменяется в пределах 48–67,9% линейного напряжения;

– напряжение  $U_2$  в точке 3 в относительных единицах при всех режимах работы электрической сети 10/0,38 кВ (режимы 5–16) остается практически таким же, что и в точке 2. Это говорит о том, что при прохождении через понижающий трансформатор Т с любой схемой соединения обмоток напряжение обратной последовательности  $U_2$  не изменяется – это обусловлено тем, что треугольник линейных напряжений при трансформации на сторону низшего напряжения сохраняется неизменным, но может поворачиваться с учетом группы соединения обмоток понижающего трансформатора. В точке 4 напряжение  $U_2$  незначительно изменяется из-за влияния несимметрии фазных нагрузок потребителей 380 В.

На рис. 2 в качестве примера показано изменение векторных диаграмм напряжений при компьютерном моделировании для различных точек электрической сети напряжением 10/0,38 кВ (точки 1–4) при обрыве провода фазы В при симметричной ( $P_A = P_B = P_C = 100\%$ , режим 9) и несимметричной ( $P_A = 0$ ,  $P_B = P_C = 100\%$ , режим 10) нагрузках потребителей напряжением 380 В.

Рисунок 2 иллюстрирует следующее:

– в точке 1 векторная диаграмма линейных напряжений симметрична;

– в точке 2 вследствие обрыва провода фазы В вершина треугольника линейных напряжений (точка В) перемещается на середину вектора линейного напряжения  $\underline{U}_{CA}^{BH}$ , при этом вектор напряжения  $\underline{U}_{CA}^{BH}$  сохраняет свое положение на комплексной плоскости, два дру-

гих вектора напряжений  $\underline{U}_{AB}^{BH}$  и  $\underline{U}_{BC}^{BH}$  поворачиваются, уменьшаются и становятся равными половине линейного напряжения  $\underline{U}_{CA}^{BH}$ ;

– в точках 3 и 4 на стороне низшего напряжения понижающего трансформатора со схемой соединения обмоток  $\Delta/Y_H$  происходят следующие изменения: линейное напряжение  $\underline{U}_{CA}^{BH}$  трансформируется без изменения, обуславливая фазное напряжение  $\underline{U}_{CN}$ , которое сонаправлено с вектором  $\underline{U}_{CA}^{BH}$ , а линейные напряжения  $\underline{U}_{AB}^{BH}$  и  $\underline{U}_{BC}^{BH}$  обуславливают напряжения  $\underline{U}_{AN}$  и  $\underline{U}_{BN}$ , векторы которых направлены встречно вектору напряжения  $\underline{U}_{CN}$  и по величине равны его половине  $\underline{U}_{AN} = \underline{U}_{BN} = \underline{U}_{CN} / 2$ .

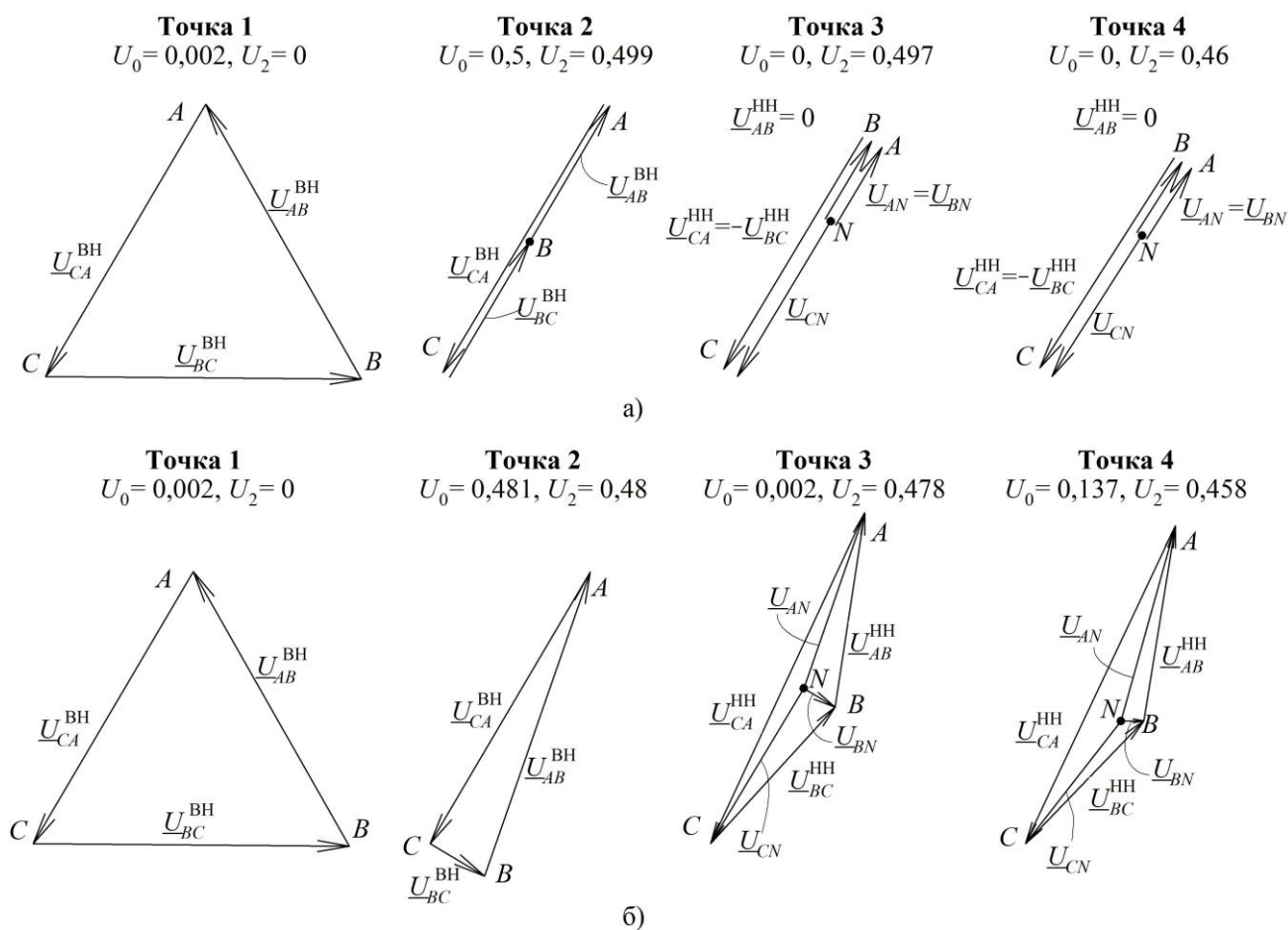


Рис. 2. Векторные диаграммы напряжений при обрыве провода фазы В при симметричной (а) и несимметричной (б) нагрузках потребителей 380 В в разных точках сети 10/0,38 кВ.

При наличии несимметрии фазных нагрузок потребителей 380 В векторные диаграммы линейных напряжений в точках 2, 3 и 4 деформируются (рис. 2, б), при этом точка В векторных диаграмм линейных напряжений перемещается на комплексной плоскости в зависимости от степени несимметрии. Это обусловлено перераспределением магнитных потоков в магнитопроводе понижающего трансформатора (при отсутствии питания фазы В со стороны высшего напряжения).

Сопоставление результатов исследований изменений напряжений по длине электрической сети 10/0,38 кВ, проведенных с помощью компьютерного и физического моделирования, показывает их хорошее качественное совпадение, некоторые количественные различия обусловлены физическими отличиями элементов электрической сети 10/0,38 кВ, используемых в компьютерной и физической моделях.

Проведенные исследования изменений напряжений в точках 1–4 позволили определить следующий информационный параметр для построения релейной защиты при обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ.

Напряжение нулевой последовательности  $U_0$  несет информацию об обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ только в точке 2. Через понижающий трансформатор это напряжение не проходит и, следовательно, в качестве информационного параметра может быть использовано только в этой точке.

Напряжение обратной последовательности  $U_2$  об обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ несет информацию в точках 2, 3 и 4, причем на стороне высшего и низшего напряжения понижающего трансформатора оно изменяется одинаково. А учитывая такой фактор, как сложность построения и обслуживания защиты на напряжении 10 кВ в сравнении с напряжением 380 В, можно говорить о предпочтительности построения защиты на стороне низшего напряжения понижающего трансформатора и использовании в качестве информационного параметра напряжения  $U_2$ .

После исследования изменений напряжений по длине электрической сети напряжением 10/0,38 кВ рассмотрим подробнее изменения напряжений в точке 3, где обычно устанавливаются устройства защиты и счетчики электрической энергии. Результаты этих исследований в дальнейшем могут быть использованы для построения защиты электрической сети при обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ. Для этого по аналогии с [5] рассмотрим векторные диаграммы напряжений в 16 режимах (см. таблицу), построенные по результатам компьютерного моделирования электрической сети напряжением 10/0,38 кВ (рис. 3). Анализ векторных диаграмм показывает следующее.

В нормальном режиме работы ВЛ-10 кВ треугольник векторных диаграмм линейных напряжений остается практически без изменений при любых изменениях нагрузки (отклонения от номинальных значений не превышают  $\pm 1\%$ ).

#### **При обрыве провода одной из фаз в сети 10 кВ**

– В симметричном режиме работы (режимы 5 и 8, 9 и 12, 13 и 16) диаграммы совпадают с аналогичными, рассмотренными ранее на рис. 2. При этом напряжение фазы, отстающей от фазы, в которой произведен обрыв, остается без изменения (при обрыве ВЛ-10 кВ в фазе А, В, С – это вектор  $\underline{U}_{BN}$ ,  $\underline{U}_{CN}$  и  $\underline{U}_{AN}$ , соответственно), другие два фазных напряжения равны между собой и составляют половину фазного напряжения  $\underline{U}_{\phi}$ .

– При наличии несимметрии в режимах 11 и 14 векторные диаграммы ведут себя так же, как и в симметричных режимах. Поскольку в режиме 11 (обрыв провода фазы В) наличие нагрузки в фазе С и отсутствие таковой в фазах А и В оставляют векторы  $\underline{U}_{AN}$  и  $\underline{U}_{BN}$  без изменения. В режиме 14 (обрыв провода фазы С) схожая ситуация: наличие нагрузки в фазах В и С оставляет векторы  $\underline{U}_{BN}$  и  $\underline{U}_{CN}$  равными по величине и фазе, в то время как вектор  $\underline{U}_{AN}$  не зависит от наличия нагрузки в фазе А.

– В режимах 6, 7, 10 и 15 напряжение фазы, отстающей от фазы, в которой произведен обрыв, также остается без изменения. Другие же фазные напряжения претерпевают изменения как по величине, так и по фазе. Так, один из деформированных фазных векторов уменьшается в 2,5–4 раза (в зависимости от режима), в то время как другой увеличивается вплоть до фазного значения. Причем на векторных диаграммах 6 и 7 видно, что точка С при обрыве провода фазы А перемещается на другую сторону относительно нейтральной точки, и вектор  $\underline{U}_{CN}$  становится опережающим фазное напряжение  $\underline{U}_{BN}$  по фазе.

На рис. 4 представлены изменения напряжения обратной  $U_2$  последовательности в разных точках электрической сети, полученные при исследованиях на компьютерной (КМ) и физической модели (ФМ). Пунктиром показаны диапазоны изменения этих напряжений при различных режимах работы ВЛ-10 кВ (нормальный режим и при обрыве провода различных фаз А, В, С) и различных степенях несимметрии нагрузок потребителей в сети

напряжением 380 В. Штриховкой обозначены области изменения этих напряжений при нормальном режиме работы ВЛ-10 кВ и при обрыве ее фазного провода.

Рисунок 4 показывает, что в точках 2, 3, 4 после места обрыва фазного провода ВЛ-10 кВ изменения напряжения обратной последовательности  $U_2$  имеют одинаковый характер. При нормальном режиме работы ВЛ-10 кВ напряжение  $U_2$  в относительных единицах не превышает 0,05 линейного значения, а при обрыве провода в симметричной сети увеличивается до 0,5 линейного напряжения, при изменении несимметрии фазных нагрузок потребителей 380 В изменяется в пределах 0,26–0,68 линейного напряжения.

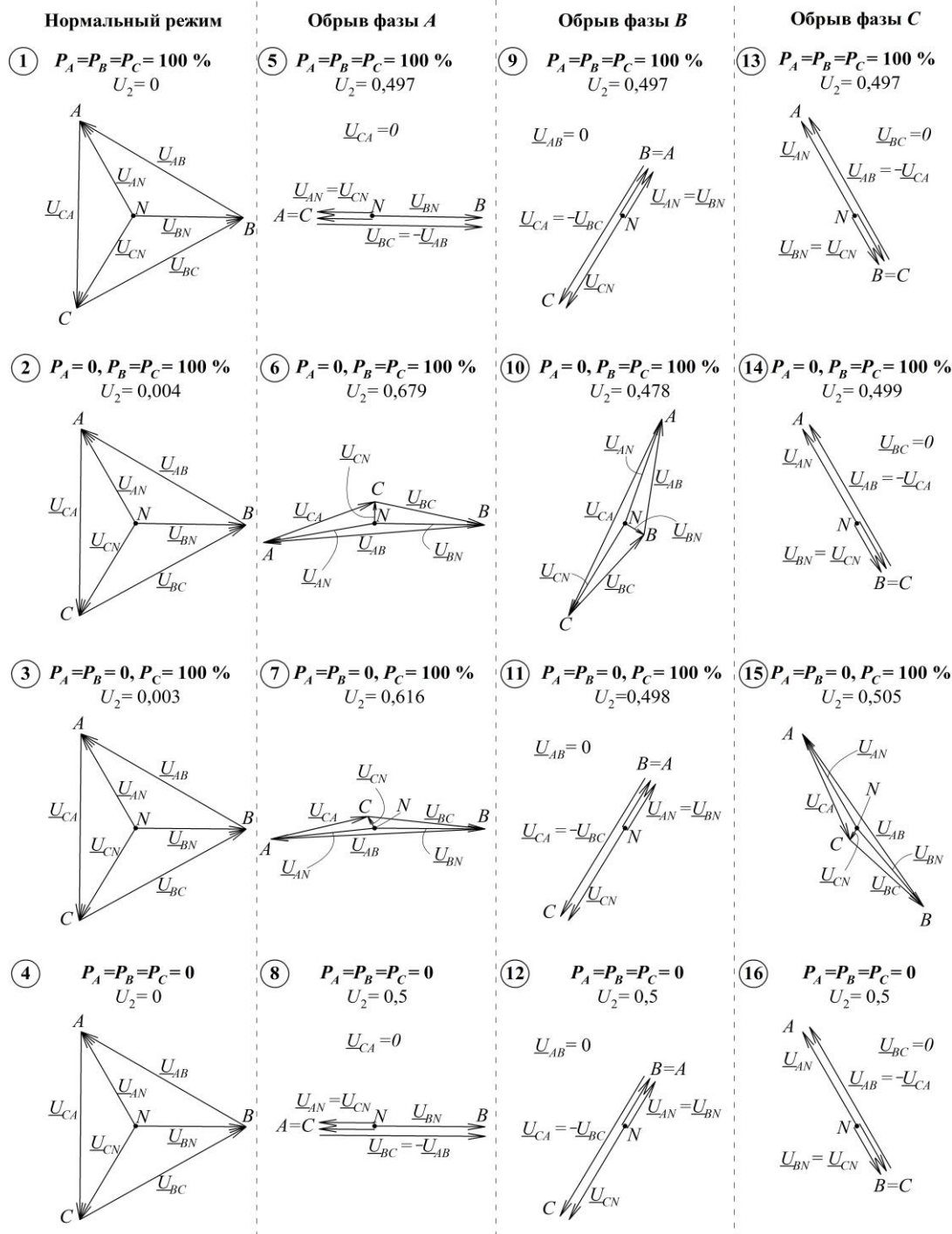
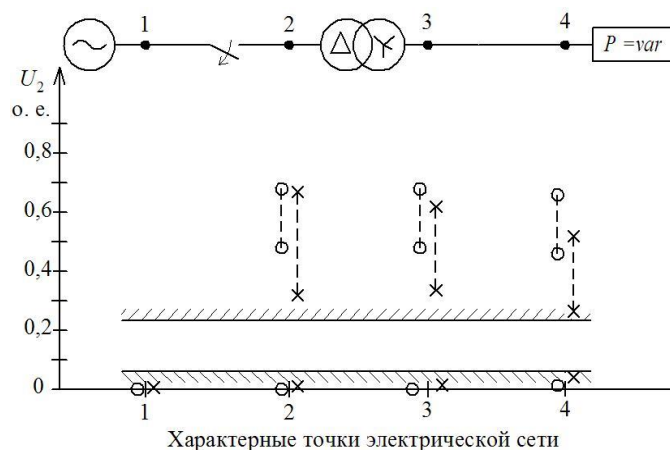


Рис. 3. Векторные диаграммы напряжений на стороне НН понижающего трансформатора напряжением 10/0,4 кВ со схемой и группой соединения обмоток  $\Delta Y_H-11$ .





**Рис. 4. Изменения напряжения обратной  $U_2$  последовательности в разных точках исследуемой электрической сети 10/0,38 кВ, полученные при компьютерном (○) и физическом (×) моделировании:  $\backslash\backslash\backslash$  – область нормального режима работы ВЛ-10 кВ;  $\lll$  – область обрыва фазного провода ВЛ-10 кВ**

При проведении подобных исследований напряжений  $U_0$  и  $U_2$  с использованием трансформатора со схемой и группой соединения обмоток  $Y/Y_H-0$  получены схожие результаты [5]. В случае со схемой соединения обмоток трансформатора «звезда–звезда с нулем» на треугольники векторных диаграмм линейных напряжений в точках 2–4 оказывает сильное влияние несимметричная нагрузка потребителей, что в значительной степени сказывается на напряжениях  $U_0$  (в точке 2) и  $U_2$  (в точках 2–4). Сопоставление результатов компьютерного моделирования показало: при обрыве фазного провода в сети с трансформатором со схемой соединения обмоток  $Y/Y_H$  напряжения  $U_0$  и  $U_2$  возрастают сильнее и находятся в пределах от 0,46 до 0,95 о. е., в то время как в сети с трансформатором со схемой соединения обмоток  $\Delta/Y_H$  напряжения  $U_0$  и  $U_2$  в этих же точках равны 0,458–0,68 о. е., в нормальном же режиме работы эти напряжения одинаково невелики в обоих случаях схем соединения обмоток трансформатора.

Проведенные исследования показывают, что указанные изменения напряжения обратной последовательности  $U_2$  являются четкой информацией об обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ, и напряжение  $U_2$  может быть использовано в качестве информационного параметра для построения соответствующей защиты.

С учетом максимальных отклонений напряжения питающей сети в пределах  $\pm 10\%$ , значение уставки устройства защиты по напряжению обратной последовательности можно определить в пределах 7–17% линейного напряжения. При исследованиях напряжений в сети с трансформатором со схемой соединения обмоток  $Y/Y_H$  определены такие же пределы уставки [5].

### Заключение

Проведенные исследования изменений напряжений нулевой и обратной последовательностей в различных точках электрической сети напряжением 10/0,38 кВ при обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ позволили получить их качественные и количественные характеристики, которые могут быть использованы при разработке устройств защиты.

Анализ количественных характеристик напряжения обратной последовательности показал, что его можно использовать в качестве информационного параметра при построении защит, которые могут быть установлены как в конце ВЛ-10 кВ, так и на стороне низшего напряжения понижающего трансформатора 10/0,4 кВ со схемой соединения обмоток «треугольник–звезда с нулем».

Устройство защиты при обрыве фазного провода ВЛ-10 кВ предпочтительнее устанавливать на стороне низшего напряжения трансформатора напряжением 10/0,4 кВ. В сравнении с установкой устройства на стороне высшего напряжения трансформатора 10/0,4 кВ оно проще в использовании, менее затратно и наименее громоздко.

Установлено, что схема соединения обмоток трансформатора не влияет на величину уставки устройства защиты по напряжению обратной последовательности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авербух А.М. Примеры расчётов неполнофазных режимов и коротких замыканий. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. 184 с.
2. Вагнер К.Ф., Эванс Р.Д. Метод симметричных составляющих в применении к анализу несимметричных электрических цепей. Л.: ГРЭЛ, 1936. 406 с.
3. Веников В.А. Теория подобия и моделирование (применительно к задачам электроэнергетики). М.: Высшая школа, 1976. 479 с.
4. Григорьев А.В., Селивахин А.И., Сукманов В.И. Защита сельских электросетей. Алма-Ата: Кайнар, 1984. 128 с.
5. Ершов А.М., Хлопова А.В., Сидоров А.И. Сигнализация о возникновении обрыва фазного провода воздушной линии напряжением 6-10 кВ // Электрические станции. 2017. № 12. С. 34–40.
6. Ершов А.М., Хлопова А.В. Физическая модель электрической сети напряжением 10/0,38 кВ // Электробезопасность. 2016. № 2. С. 13–21.
7. Косоухов Ф.Д., Наумов И.В. Несимметрия напряжений и токов в сельских распределительных сетях. Иркутск: ИГСА, 2003. 259 с.
8. Крючков И.П., Старшинов В.А., Гусев Ю.П., Пираторов В.В. Переходные процессы в электроэнергетических системах. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 416 с.
9. Наумов И.В., Иванов Д.А. Исследование показателей несимметрии в действующих электрических сетях // Вестник ИрГСХА. 2008. Вып. 30. С. 78–84.
10. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов. М.: Энергия, 1970. 520 с.
11. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
12. Хлопова А.В., Ершов А.М. Компьютерная модель для исследования режимов работы электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ // Наука ЮУрГУ [Электронный ресурс]: материалы 68-й научной конференции. Секции технических наук. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. С. 799–805.

[THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE](#)

## Ecological Safety of Construction and Municipal Economy

DOI.org/10.5281/zenodo.1408246

Ershov A., Khlopova A., Sidorov A.

ALEKSANDR ERSHOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,  
e-mail: a.m.ershov@mail.ru

ANNA KHLOPOVA, Department Assistant, e-mail: annienergo@mail.ru,  
<https://orcid.org/0000-0002-8048-6148>

Department of Electric Stations, Networks and Power Supply Systems

ALEKSANDR SIDOROV, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Life Safety  
Department, e-mail: bgd-susu@mail.ru

South Ural State University

*National Research University*

76, Lenin Av., Chelyabinsk, Russia, 454080

### Modelling of the electrical safety system in case of a phase failure

**Abstract:** Faulty wires of the overhead power lines at the voltage 10 kV result in reduced quality of the electric power supplied to consumers, fire hazards in the area of the damaged overhead line, and increased risks of electrocution for people which, in most cases, is fatal. At present, the operating electricity networks have no devices of prompt blackouts when there are downed 10 kV power-lines. To create a protection providing electrical safety when wire is faulty, it is negative and zero sequence voltages that are used as information parameters, whereas the device itself is installed either at the end of the overhead 10 kV power lines or on the side of the low voltage of the 10/0.4 kV step-down transformer. To select the information parameter, to obtain its quantitative characteristics, and to determine the location of the protection device, laboratory studies were undertaken on voltages with the use of the computer simulation in the MATLAB software environment and physical modelling. The paper presents the results of the studies of negative and zero sequence voltages at various points in the 10/0.38 kV electric network and a transformer with the winding connection ‘delta-star with zero’ when the 10 kV overhead line is downed. It has been demonstrated that the negative sequence voltage more fully characterises the phase wire breakage of the overhead 10 kV voltage line than the zero-sequence voltage; the information about the negative sequence voltage can be obtained both at the side of a high and a low voltage of the step-down transformer with 10/0.4 kV. The installation of the protection device on the low voltage side of the 10/0.4 kV step-down transformer has been substantiated. Underlined is the importance of the installation of the negative sequence voltage protection device. Compared are the results of the research with those obtained earlier when investigating the voltages in a 10/0.38 kV electric network and the transformer with winding connection ‘star-star with zero’.

*Key words:* overhead 10kV line, phase failure, protection device, negative sequence voltage, zero sequence voltage.

#### REFERENCES

1. Averbukh A.M. Examples of calculations unbalance and short-circuits. Leningrad, Energiya, 1979, 184 p.
2. Vagner K.F., Evans R.D. The method of symmetrical components in the application to the analysis of asymmetrical electric circuits. Leningrad, GREL, 1936, 406 p.

3. Venikov V.A. Similary theory and modeling (in relation to the electric power industry). M., Vysshaya Shkola, 1976, 479 p.
4. Grigor'ev A.V., Selivakhin A.I., Sukmanov V.I. Protection of rural power grids. Alma-Ata, Kajnar, 1984, 128 p.
5. Ershov A.M., Khlopova A.V., Sidorov A.I. Signaling on the occurrence of 6–10 kV overhead line phase wire breakage. Power Technology and Engineering. 2017;12:34–40.
6. Ershov A.M., Khlopova A.V. The physical model of the mains voltage of 10/0.38 kV. Electrical Safety. 2016;2:13–21.
7. Kosoukhov F.D., Naumov I.V. Unbalance of voltages and currents in the rural distribution networks. Irkutsk, Publishing House IrSAA, 2003, 259 p.
8. Krjuchkov I.P., Starshinov V.A., Gusev Yu.P., Piratorov V.V. Transient processes in power systems. M., Publishing house MJeI, 2008, 416 p.
9. Naumov I.V., Ivanov D.A. Investigation of the asymmetry in existing electrical networks. Bulletin IrSU. 2008;30:78–84.
10. Ul'janov S.A. Electromagnetic transients in electric systems. Textbook for electrical energy and high schools. M., Energiya, 1970, 520 p.
11. Fedoseev A.M. Relay protection of electric power systems. Relay protection networks: Textbook for Universities. M., Energoatomizdat, 1984, 520 p.
12. Khlopova A.V., Ershov A.M. Computer model for the study of operating modes of the mains with voltage 6–10/0.38 kV. Proc. Science SUSU: Proceedings of 68 Scientific Conference. Section of Technical Sciences. Chelyabinsk, 2016:799–805.