

## РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 380 В С ВОЗДУШНЫМИ ЛИНИЯМИ

А.М. ЕРШОВ, Г.С. ВАЛЕЕВ, Р.Г. ВАЛЕЕВ

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск

**Аннотация:** В статье, с целью определения структуры системы распознавания обрывов нулевого и фазных проводов воздушной линии напряжением 380 В, приводится описание возможных нормальных и несимметричных режимов работы электрической сети напряжением 380 В и рассматриваются факторы, влияющие на напряжения и токи при этих режимах.

**Ключевые слова:** воздушная линия напряжением 380 В, обрыв провода, короткое замыкание, режимы работы.

Наиболее частыми повреждениями в электрических сетях напряжением 380 В с глухозаземлённой нейтралью являются обрывы фазных и нулевого проводов воздушных линий электропередачи. Это не только приводит к нарушению электроснабжения потребителей, но и создаёт электро- и пожароопасные ситуации.

Практика эксплуатации воздушных линий напряжением 380 В (ВЛ-380 В) показывает, что, несмотря на большое количество предлагаемых решений по защите ВЛ-380 В от обрывов фазных и нулевого проводов, в действующих электрических сетях на сегодняшний день данная защита фактически отсутствует. Отметим, что при разработке указанных устройств защиты анализ режимных параметров (напряжений, токов и др.) проводился в большей мере качественно без детального исследования их количественных характеристик.

Для определения структуры системы распознавания (системы защиты) обрывов фазных и нулевого проводов воздушных линий электрической сети напряжением 380 В нужно, с одной стороны, знать параметры электрической сети (напряжения и токи) при аварийных режимах её работы, на которые они должны реагировать, а с другой – параметры нормальных режимов работы электрической сети, от которых следует отстраиваться [1, 2 и др.].

Решение задачи необходимо разделить на следующие части:

1. Анализ нормальных режимов работы электрической сети, на которые устройства защиты не должны реагировать.

2. Анализ режимов работы воздушных линий, связанных с обрывами фазных и нулевого проводов, опасных как для людей и животных, так и подключенных к электрической сети электроприёмников.

3. Анализ режимов работы электрической сети, обусловленных другими видами повреждений воздушной линии.

4. Определение перечня информационных параметров, характеризующих как нормальные, так и различные несимметричные режимы работы воздушных линий.

5. Выявление логических признаков – параметров электрической сети (в нашем случае различного рода напряжений), различающих и характеризующих разные режимы её работы.

6. Определение логических связей между признаками.

7. Построение функциональной схемы системы защиты или анализатора режима работы электрической сети.

В данной статье, с целью дальнейшего проведения качественного и количественного анализа информационных параметров для разработанной системы защиты [3] воздушной линии напряжением 380 В при обрывах нулевого и фазных проводов, рассмотрены возможные нормальные и аварийные режимы работы электрической сети напряжением 380 В.

На напряжения и токи электрической сети в общем случае влияют:

- несимметричная нагрузка фаз потребителей, искажающая симметрию трёхфазной системы напряжений относительно нулевого рабочего провода при нормальном режиме работы самой электрической сети;
- сочетания обрывов фазных и нулевого проводов воздушных линий;
- сочетания замыканий фазных проводов с нулевым проводом воздушных линий, а также замыканий этих проводов на землю;
- несимметричная нагрузка фаз потребителей и различного рода короткие замыкания в линиях, питающихся от одной трансформаторной подстанции и т.д.

На рис. 1 показана принципиальная схема простейшей трёхфазной четырёхпроводной электрической сети, состоящей из трёхфазного трансформатора Т, подключенного к электрической сети напряжением 6–10 кВ, четырёхпроводной воздушной линии напряжением 380 В (ВЛ-380 В) и нагрузки потребителей электрической энергии в конце линии. На вводе потребителя включен микропроцессорный трёхфазный счётчик электроэнергии.

На рис. 1 используются следующие обозначения:

$R_{ЗУ.ТП}$ ,  $R_{П}$ ,  $R_{ЗУ.П}$  – сопротивления заземляющих устройств трансформаторной подстанции, повторных заземлений нулевого провода воздушной линии напряжением 380 В и потребителя электроэнергии;

$S_{Н}$ ,  $Z_{Н}$  – мощность и сопротивление нагрузки потребителя;

$AB$  – однофазные автоматические выключатели, обеспечивающие коммутацию и защиту потребителя электрической энергии;

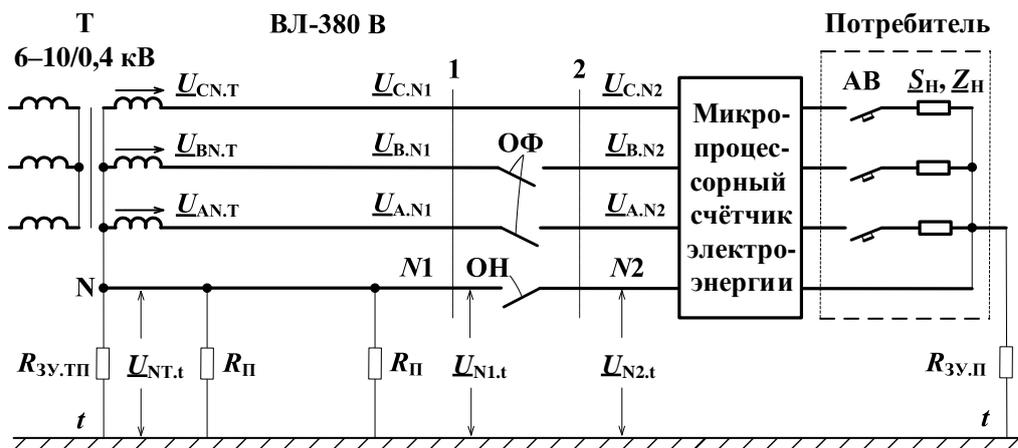


Рис. 1. Принципиальная схема электрической сети напряжением 380 В

$A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $N$  – обозначение соответственно фазных проводов и нулевого рабочего провода (далее будем использовать термин «нулевой провод») ВЛ-380 В электрической сети с системой заземления  $TN-C$ ;

$t$  – земля;

1 и 2 – пунктирные линии (сечения), обозначающие место возникновения различных видов повреждений ВЛ-380 В. Эти две линии разделяют ВЛ на два участка –

до и после места повреждения линии (от начала ВЛ до места повреждения и от места повреждения ВЛ до потребителя);

$\underline{U}_{AN.T}$ ,  $\underline{U}_{BN.T}$ ,  $\underline{U}_{CN.T}$  – фазные напряжения относительно нулевого провода на выводах силового трансформатора Т;

$\underline{U}_{A.N1}$ ,  $\underline{U}_{B.N1}$ ,  $\underline{U}_{C.N1}$  и  $\underline{U}_{A.N2}$ ,  $\underline{U}_{B.N2}$ ,  $\underline{U}_{C.N2}$  – напряжения фазных проводов относительно нулевого провода соответственно в точках N1 и N2. Напряжения после места повреждения примем равными напряжениям на вводе потребителя – на вводных зажимах микропроцессорного счётчика электрической энергии;

$\underline{U}_{Nt.t}$ ,  $\underline{U}_{N1.t}$ ,  $\underline{U}_{N2.t}$  – напряжение между нулевым проводом N и землёй t в соответствующих точках ВЛ;

С целью упрощения записей введём следующие обозначения:

НР – нормальный режим;

ОФ – обрыв фазного провода;

ОН – обрыв нулевого провода;

Откл – отключение автоматического выключателя АВ в одной из фаз потребителя;

*vario* и *const* – состояния фазных нагрузок потребителя  $\underline{S}_{н.а}$ ,  $\underline{S}_{н.в}$ ,  $\underline{S}_{н.с}$ ;

ОКЗ – однофазное короткое замыкание – замыкание между фазным и нулевым проводами;

ДКЗ – двойное короткое замыкание – замыкание двух фазных проводов с нулевым проводом;

ТКЗ – трёхфазное короткое замыкание – замыкание между тремя фазными проводами;

МКЗ – междуфазное короткое замыкание – замыкание между двумя фазными проводами.

Составим перечень возможных режимов работы электрической сети напряжением 380 В с четырёхпроводной воздушной линией, питающей потребителя электрической энергии, некоторая часть которых описана в работах [4–9 и др.]. Режимы работы определяются следующими факторами:

1. Состоянием воздушной линии. Она может находиться в нормальном режиме работы, в линии могут происходить обрывы фазных и нулевых проводов с их падением на землю и без соприкосновения с землей и другими предметами, в линии могут возникать различные варианты коротких замыканий.

2. Характером изменения электрической нагрузки потребителей – пофазное изменение нагрузки.

3. Состоянием фазных автоматических выключателей, устанавливаемых на вводе потребителя. Состояние выключателей влияет на несимметрию нагрузок потребителя.

4. Сопротивлениями заземляющих устройств потребителя, трансформаторной подстанции, повторных заземлений нулевого провода воздушной линии и потребителя.

5. Несимметрией нагрузок фаз потребителей и различного рода повреждениями, возникающими в линиях, питающихся от одного трансформатора, – главным образом различного вида короткими замыканиями.

Указанные факторы тем или иным образом влияют на напряжения и токи (параметры) этой электрической сети.

Целью исследования режимов работы является выявление характерных признаков, которые могут быть использованы для распознавания режимов работы электрической сети и построения соответствующих устройств защиты.

На рис. 2 показано графическое представление возможных эксплуатационных 34 режимов работы электрической сети напряжением 380 В. Рассмотрим подробнее каждый из режимов работы электрической сети.

## **1. Нормальный режим работы электрической сети, при котором трансформаторная подстанция и воздушная линия находятся в рабочем состоянии**

Режим 1. Нагрузка потребителя симметрична во всех трёх фазах и равна 100 % максимальной рабочей нагрузки  $P_{Н.МАКС}$  (активно-индуктивной или чисто активной).

Примечание. Последующие исследования влияния характера нагрузки (от активно-индуктивного до чисто активного) на величину напряжений электрической сети показали, что характер нагрузки потребителей заметного влияния не оказывает. Поэтому все исследования проведены при чисто активной нагрузке. Значения нагрузок  $P_{Н}$  задавались при номинальном напряжении сети, при этом напряжения в начале и в конце находились в пределах  $(1,05-0,95) \cdot U_{НОМ}$ .

Режим 2. Нагрузка потребителя меняется в одной фазе в диапазоне 100–0 %  $P_{Н.МАКС}$  при постоянных нагрузках в двух других фазах, равными 100 %. Несимметричное изменение нагрузки по фазам приводит к искажению линейных и фазных напряжений электрической сети, а также к появлению напряжения несимметрии  $U_{НС}$  системы трёх фазных напряжений относительно нулевого провода ВЛ-380 В.

Режим 3. Нагрузка потребителя изменяется одновременно в двух фазах в диапазоне 100–0 %  $P_{Н.МАКС}$  при неизменной нагрузке в третьей фазе, равной 100 %.

Режимы 4, 5, 6. Отключение автоматических выключателей, установленных у потребителя, в одной или одновременно в двух фазах подобно предельным состояниям режимов 2 и 3, когда  $P_{Н.МАКС} = 0$  % при изменении нагрузки в работающих фазах.

### **2. Обрывы фазных проводов воздушной линии**

Режимы 7 и 8. При обрыве одного фазного провода нагрузка потребителя изменяется соответственно в одной или одновременно в двух фазах в диапазоне 100–0 %  $P_{Н.МАКС}$ .

Режим 9. При обрыве одного фазного провода и отключенном автоматическом выключателе во второй фазе изменяется нагрузка в третьей фазе в диапазоне 100–0 %  $P_{Н.МАКС}$ .

Режим 10. При обрыве двух фазных проводов нагрузка потребителя в оставшейся в работе фазе изменяется в диапазоне 100–0 %  $P_{Н.МАКС}$ . По нагрузочным характеристикам режимы 9 и 10 подобны, но входные напряжения микропроцессорного счётчика различны – в режиме 9 на счётчик поступают два фазных напряжения относительно нулевого провода, а режиме 10 – только одно фазное напряжение относительно нулевого провода.

Режим 11. При одновременном обрыве трёх фазных проводов потребитель теряет все фазные напряжения, но при этом он связан с электрической сетью нулевым проводом.

### **3. Обрывы нулевого провода**

Режимы 12 и 13. При обрыве нулевого провода нагрузка потребителя изменяется соответственно в одной или одновременно в двух фазах в диапазоне 100–0 %  $P_{Н.МАКС}$ .

Режимы 14 и 15. При обрыве нулевого провода и отключении автоматического выключателя на вводе потребителя изменяется нагрузка в одной фазе в диапазоне 100–0 %  $P_{Н.МАКС}$ , а во второй сохраняется равной 100 %  $P_{Н.МАКС}$  или нагрузка изменяется одновременно в двух фазах.

Режим 16. При обрыве нулевого провода и отключении автоматических выключателей двух фаз потребитель теряет питание и оказывается под фазным напряжением неповреждённой фазы, в том числе и его нулевой провод.

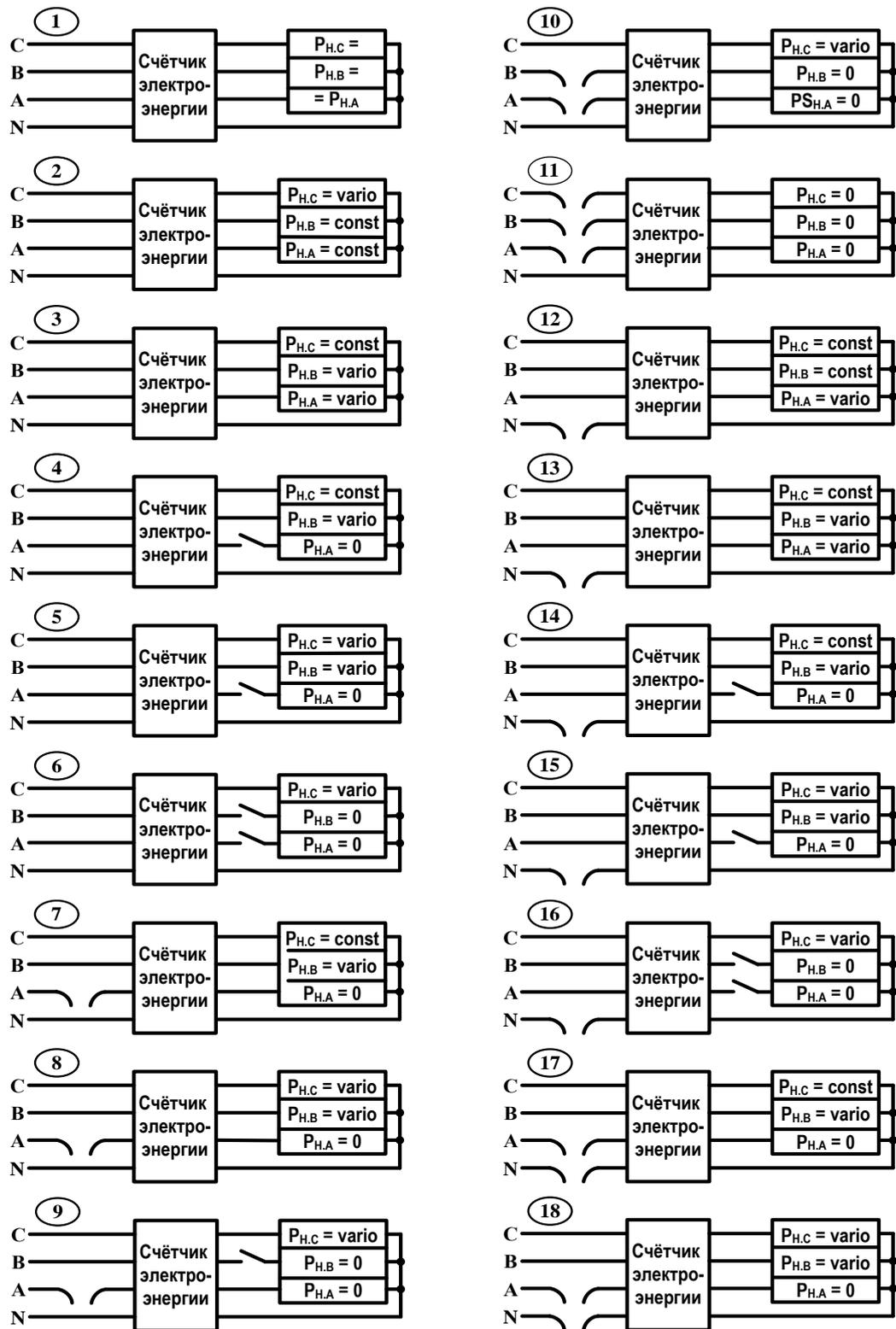
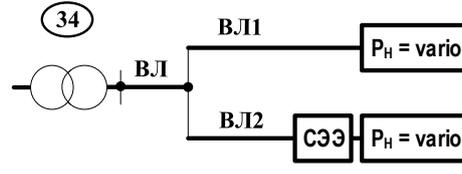
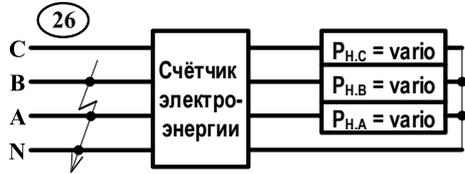
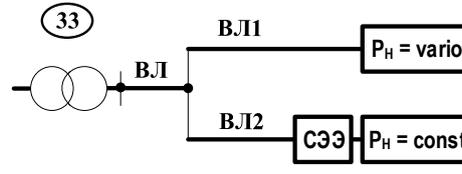
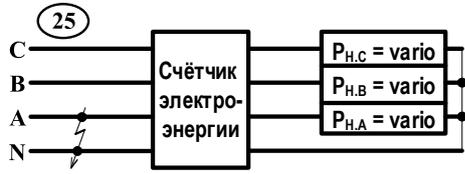
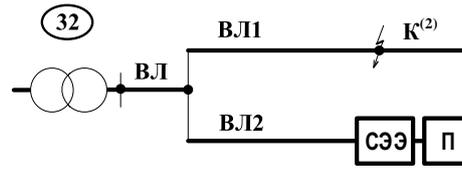
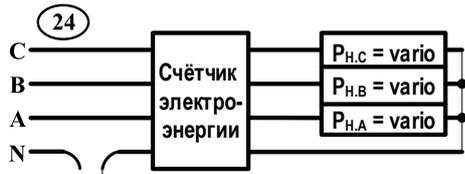
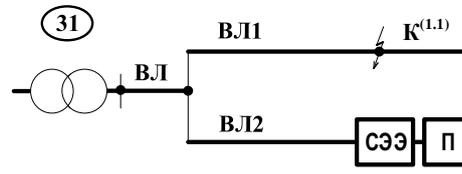
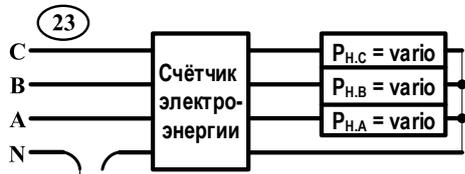
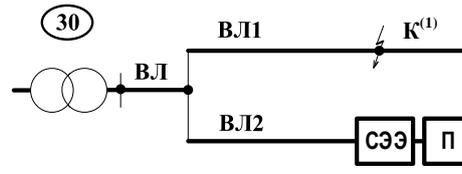
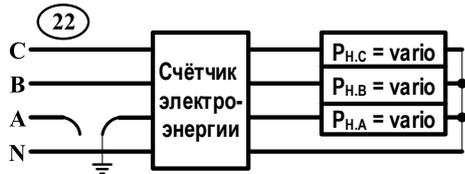
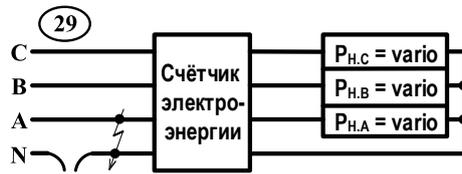
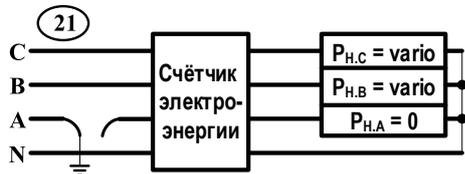
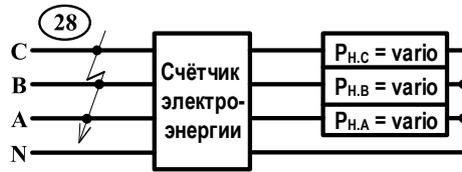
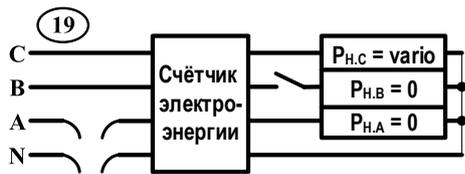


Рис. 2. Возможные режимы работы электрической сети напряжением 380 В



Окончание рис. 2. Возможные режимы работы электрической сети напряжением 380 В

#### **4. Одновременный обрыв фазных и нулевого проводов**

Режимы 17 и 18. При одновременном обрыве одного фазного и нулевого проводов нагрузка изменяется соответственно в одной фазе потребителя или одновременно в двух.

Режим 19. При одновременном обрыве одного фазного и нулевого проводов и отключении автоматического выключателя потребитель теряет питание и оказывается под фазным напряжением неповреждённой фазы, в том числе и его нулевой провод – аналогично режиму 16.

Режим 20. При обрыве двух фазных проводов и нулевого провода ситуация подобна режимам 16 и 19.

Режимы 21 и 22. При обрыве одного фазного провода и его падении на землю (замыкание на землю) соответственно со стороны источника питания ( $Z_1$ ) или со стороны потребителя ( $Z_2$ ) нагрузка может меняться в одной фазе потребителя или одновременно в двух.

Режимы 23 и 24. При обрыве нулевого провода и его падении на землю (замыкание на землю) соответственно со стороны источника питания ( $Z_1$ ) или со стороны потребителя ( $Z_2$ ) нагрузка может меняться в каждой фазе потребителя независимо.

#### **5. Короткие замыкания**

Режим 25. Однофазное короткое замыкание (замыкание между фазным и нулевым проводами –  $K^{(1)}$ ).

Режим 26. Двойное короткое замыкание (замыкание двух фазных проводов с нулевым проводом –  $K^{(1,1)}$ ).

Режим 27. Междофазное короткое замыкание между двумя фазными проводами  $K^{(2)}$ .

Режим 28. Трёхфазное короткое замыкание между тремя фазными проводами  $K^{(3)}$ .

Режим 29. Обрыв нулевого провода с одновременным замыканием между фазным и нулевым проводами со стороны потребителя.

Режим 30. Однофазное короткое замыкание в параллельной воздушной линии, питающейся от одного трансформатора.

Режим 31. Двойное короткое замыкание в параллельной воздушной линии, питающейся от одного трансформатора.

Режим 32. Междофазное короткое замыкание в параллельной воздушной линии, питающейся от одного трансформатора.

Режим 33. Различные варианты изменения фазных нагрузок в параллельной воздушной линии при неизменной симметричной нагрузке в исследуемой линии.

Режим 34. Различные варианты одновременного изменения нагрузок в параллельной и исследуемой линиях.

#### **Вывод**

1 В данной статье сделана попытка показать масштабность и направления исследований, необходимых для создания устройств защиты воздушных линий напряжением 380 В от обрывов фазных и нулевого проводов.

2 Рассмотрение возможных нормальных и аварийных режимов работы электрической сети напряжением 380 В позволит провести качественный и количественный анализ информационных параметров с использованием компьютерного [10] и физического [11] моделирования, а также экспериментальные исследования в опытной электрической сети напряжением 10/0,38 кВ [12], построенной на полигоне «Челябэнерго», и в действующих электрических сетях [13].

3 Получение качественных и количественных изменений информационных параметров позволит, во-первых, определить какие информационные параметры лучше использовать для построения системы защиты воздушной линии напряжением 380 В при обрывах фазных и нулевого проводов, во-вторых, сформировать её структуру, в-третьих, количественно определить необходимые уставки.

### Summary

*In the article for the purpose of determining the structure of the system of recognition breaks the neutral and phase conductors overhead line voltage of 380 V is a description of the possible normal modes and asymmetrical mains voltage of 380 V and examined the factors influencing the voltages and currents in these modes.*

*Keywords: overhead line voltage of 380 V, broken wire, short circuit, modes. A.M. Ershov, G.S. Valeev, R.G. Valeev Modes of operation electrical network voltage of 380 V with overhead lines.*

### Литература

1. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: Учебник для вузов / В.А. Андреев. М.: Высшая школа, 2007. 639 с.
2. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: Учебное пособие для вузов / А.М. Федосеев. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
3. Патент № 2581607 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 5/10. Способ защиты от обрывов фазных и нулевого проводов четырёхпроводной воздушной линии электрической сети напряжением 380 В и устройство для его реализации / А.М. Ершов, А.В. Млоток, О.В., Филатов, А.И. Сидоров, А.В. Запорожский, Р.Г. Валеев. № 2014142515/07; заявл. 21.10.2014; опубл. 20.04.2016, Бюл. № 11. 18 с.
4. Григорьев А.В. Защита сельских электросетей / А.В. Григорьев, А.И. Селивахин, В.И. Сукманов. Алма-Ата: Кайнар, 1984. 128 с.
5. Крючков, И.П. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов / И.П. Крючков В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов; под ред. И.П. Крючкова. М.: Изд. дом МЭИ, 2008. 416 с.
6. Крючков И.П. Короткие замыкания и выбор электрооборудования: учебное пособие для вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев и др.; под ред. И.П. Крючкова, В.А. Старшинова. М.: Изд. дом МЭИ, 2012. 568 с.
7. Млоток А.В. Обеспечение электробезопасности при обрывах фазных и нулевого проводов воздушных линий напряжением 380 В: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / А.В. Млоток. Челябинск: ЮУрГУ, 2014. 265 с.
8. Гынянский В.Г. Распознавание режимов работы воздушных линий напряжением 0,4 кВ и электроприёмников: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / В.Г. Гынянский. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2005. 244 с.
9. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: Учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов. М.: Энергия, 1970. 520 с.
10. Валеев Р.Г. Моделирование электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями в программной среде MATLAB–SIMULINK / Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.М. Ершов, А.И. Сидоров // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2013. № 9–10. С. 116–128.
11. Ершов А.М. Разработка физической модели электрической сети напряжением 380 В / Ершов А.М., Валеев Р.Г., Сидоров А.И., Млоток А.В. Электробезопасность. 2014. № 1. С. 3–18.
12. Млоток А.В. Опытная электрическая сеть напряжением 380 В / А.В. Млоток, А.М. Ершов, Р.Г. Валеев, А.И. Сидоров. Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2014. № 2 (19). С. 96–107.
13. Ершов А.М. Исследование аварийных режимов в сельских электрических сетях напряжением 380 В / А.М. Ершов, Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.И. Сидоров // Техника в сельском хозяйстве. 2013. № 6. С. 18–21.

*Поступила в редакцию*

*01 июля 2016 г.*

**Ершов Александр Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры "Системы электроснабжения" Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), г. Челябинск. Тел.: 8(351)2679318. E-mail: a.m.ershov@mail.ru.

**Валеев Галимьян Сабирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры "Системы электроснабжения". Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), г. Челябинск. Тел.: 8(351)2679318, 8(912)3224575. E-mail: valeevgs@mail.ru.

**Валеев Рустам Галимьянович** – канд. техн. наук, доцент кафедры "Системы электроснабжения". Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), г. Челябинск. Тел.: 8(351)2679318, 8(912)3224575. E-mail: valeevrustam@mail.ru.