

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ДЛИНЫ ЛИНИИ 0,4 кВ,  
ВЫПОЛНЕННОЙ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНЫМИ ВОЗДУШНЫМИ  
ЛИНИЯМИ, ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОТНОШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ  
НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ К ОБРАТНОЙ В КАЧЕСТВЕ  
КРИТЕРИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБРЫВА НУЛЕВОГО ПРОВОДА**

*А.Е. Анчугов*

Приведены данные о влиянии несимметрии нагрузок фаз на электробезопасность в сетях напряжением 380 В с неизолированными проводами при возникновении аварийных режимов. Исследовано влияние длины линии на эффективность обнаружения обрывов нулевого провода при использовании рассматриваемого критерия. Установлена критическая длина линии, при которой сохраняется его эффективность при заданных параметрах сети.

Ключевые слова: воздушная линия электропередач, обрыв, несимметрия, нулевой провод, электробезопасность.

Жизнь современного человека невозможно представить без электроэнергии, которая стала одним из основных благ цивилизации. Однако эта энергия, несмотря на все достижения науки и техники, не всегда абсолютно подвластна человеку и может представлять угрозу жизни и здоровью людей. Особое внимание в этом вопросе следует уделить безопасности населения и сетям 0,4 кВ, ведь именно с ними в основном и взаимодействует общество в своей повседневной деятельности. Данные сети имеют различное исполнение – в городских условиях, при большой стесненности они преимущественно выполняются кабельными линиями. В других случаях, руководствуясь экономической целесообразностью, используют воздушные линии электропередач. Воздушные линии в свою очередь также выполняются изолированными или неизолированными проводами. В качестве изолированных проводов наиболее часто используется самонесущий изолированный провод, использование которого позволяет повысить надежность и безопасность работы сети, однако сейчас существует большое количество воздушных линий 0,4 кВ, выполненных неизолированными проводами. Кроме того, реконструирование таких сетей и замена их на линии с изолированными проводами требуют значительных капитальных вложений и времени на их проведение. Поэтому исследование и обеспечение безопасности сетей с неизолированными проводами является актуальной проблемой. Следует также отметить, что практически все ВЛ-0,38 кВ, выполненные неизолированными проводами, представляют собой элек-

трическую сеть с совмещенным нулевым рабочим и нулевым защитным проводниками, поэтому обрывы нулевого провода при наличии несимметрии нагрузок фаз в сети также может нести угрозу жизни и здоровью людей. Анализ статистических данных аварийных отключений электрических сетей напряжением 380 В, приведенных в различных источниках, показывает, что наиболее частыми повреждениями в сельских распределительных сетях и посёлках городского типа являются обрывы фазных и нулевого проводов, короткие замыкания и замыкания на землю. Удельный вес отдельных повреждений в тех или иных районах страны зависит от климатических и природных условий, состояния и конструкции сетей, особенностей эксплуатации [2, 3, 4, 5]. Воздушные электрические сети напряжением 380 В – самый ненадёжный элемент системы электроснабжения. Гололёд, сильный ветер, при котором в результате схлёстывания проводов возможно их перегорание или перетирание в местах крепления к изолятору, а также наезд техники создают условия для обрыва проводов и поражения людей и животных электрическим током [3, 4]. Анализ аварийной статистики, приведенной в литературе, показывает, что ежегодно на 100 км линий 380 В приходится 40–50 повреждений, причём около 62 % из них опасны для людей и животных [3]. Примерно 40 % всех повреждений воздушных линий составляет обрыв фазного и нулевого проводов.

Для исследования сетей 0,4 кВ, выполненных неизолированными проводами, и поиска критериев обнаружения аварийных режимов была использована компьютерная модель сети в среде Simulink программы MATLAB, основываясь на работе [6].

Внешний вид модели в интерфейсе программы представлен на рис. 1.

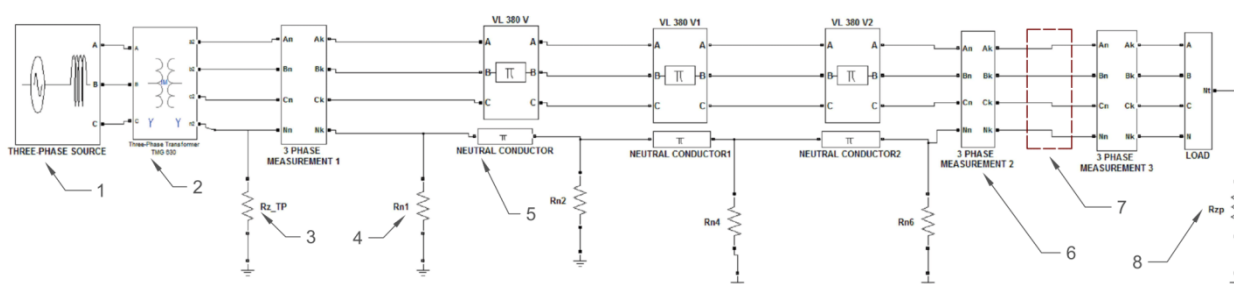


Рис. 1. Компьютерная модель для исследований, созданная в программе MATLAB:

1 – трехфазный источник, 2 – силовой трансформатор, 3 – сопротивление заземляющего устройства подстанции, 4 – повторные заземлители, 5 – четырехпроводная воздушная линия, 6 – измерительный элемент, 7 – место обрыва нулевого провода, 8 – сопротивление его заземляющего устройства потребителя

Компьютерная модель моделирует электрическую сеть напряжением 380 В с глухозаземлённой нейтралью и применением системы заземления TN-C. Особенностью этой системы является то, что нулевой рабочий проводник N и нулевой защитный проводник PE совмещены в один провод,

что приводит к возможности появления фазного напряжения на корпусах электроустановок при обрыве нулевого провода. Несмотря на это данная система широко используется. Согласно ПУЭ в электроустановках с глухо заземленной нейтралью нейтраль генератора или трансформатора трехфазного переменного тока должны быть заземлены, причем сопротивление заземляющего устройства, к которому присоединены нейтраль трансформатора, должно быть не более 4 Ом. Кроме того, согласно [1], при числе грозových часов в году не более 40 необходимо устройство повторных заземлителей через каждые 200 м сопротивлением не более 30 Ом, что и было реализовано в компьютерной модели сети, в которой четырехпроводная ВЛ напряжением 380 В с нагрузкой в конце, выполненная проводом АС-120, питается от трансформатора мощностью 630 кВА со схемой соединения обмоток  $Y/Y_0$ .

В ходе исследования критерия было проведено множество измерений в различных режимах работы сети. На рис. 2 показаны максимальные значения отношения  $U_0/U_2$ , полученные в результате обработки экспериментальных данных при различных режимах работы ВЛ.

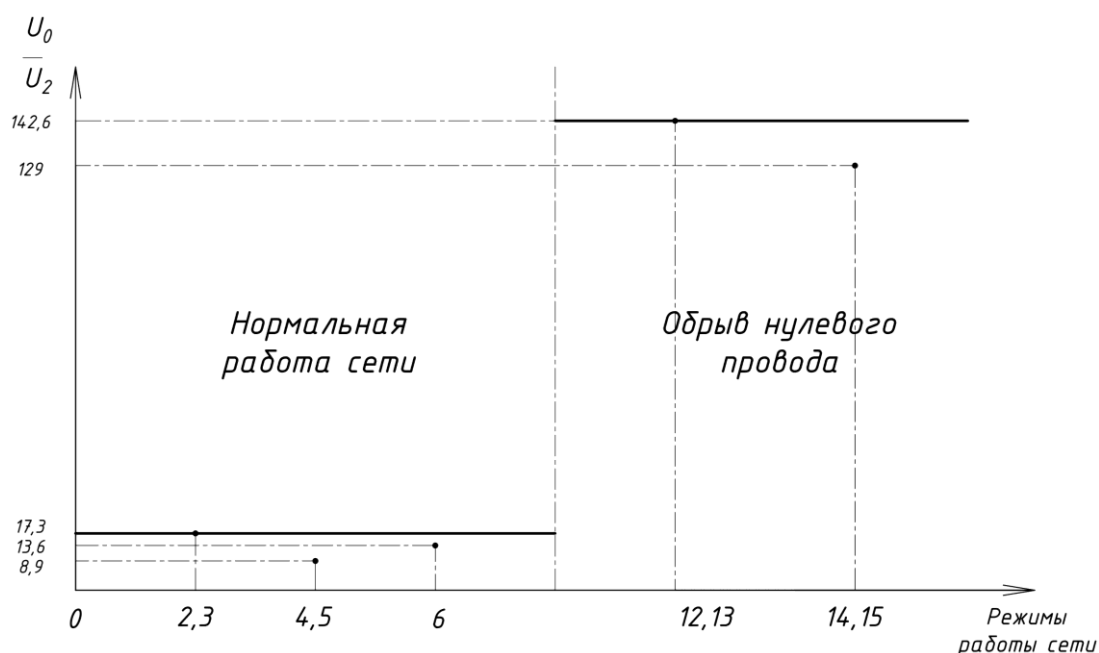


Рис. 2. Значения критерия в различных режимах работы сети

Режимы работы сети, представленные на оси абсцисс рис. 2, имеют следующие характерные особенности: 2, 3 – все провода ВЛ целы; 4, 5 – в одной из фаз потребителя отключен автоматический выключатель, установленный за счётчиком электроэнергии; 12, 13 – фазные провода целы, нулевой провод оборван; 14, 15 – нулевой провод оборван и в одной из фаз потребителя отключен автоматический выключатель.

Важным фактором для работы критерия оказалась длина воздушной линии, через которую получает питание потребитель. Так с увеличением длины воздушной линии, питающей потребителя, значения выбранного отношения напряжений значительно уменьшаются.

На рис. 3 показаны зависимости максимальных и минимальных значений  $U_0/U_2$ , зафиксированных в нормальных режимах работы сети (кривые 3 и 4 соответственно), и минимальных значений в режимах работы с оборванным нулевым проводом (кривые 1, 2).

При уменьшении длины происходит резкое увеличение значения отношения напряжения нулевой последовательности к напряжению обратной последовательности, в частности при уменьшении длины линии с 500 до 100 м абсолютный экстремум возрастает с 142,6 до 951. Также было отмечено, что при обрыве нейтрального провода этот рост существенно увеличивается, а с увеличением длины линии значения в аварийном и нормальном режимах могут накладываться. Поэтому для определения эффективной зоны действия критерия была определена критическая длина линии, при превышении которой возможны ложные обнаружения обрывов нулевого провода.

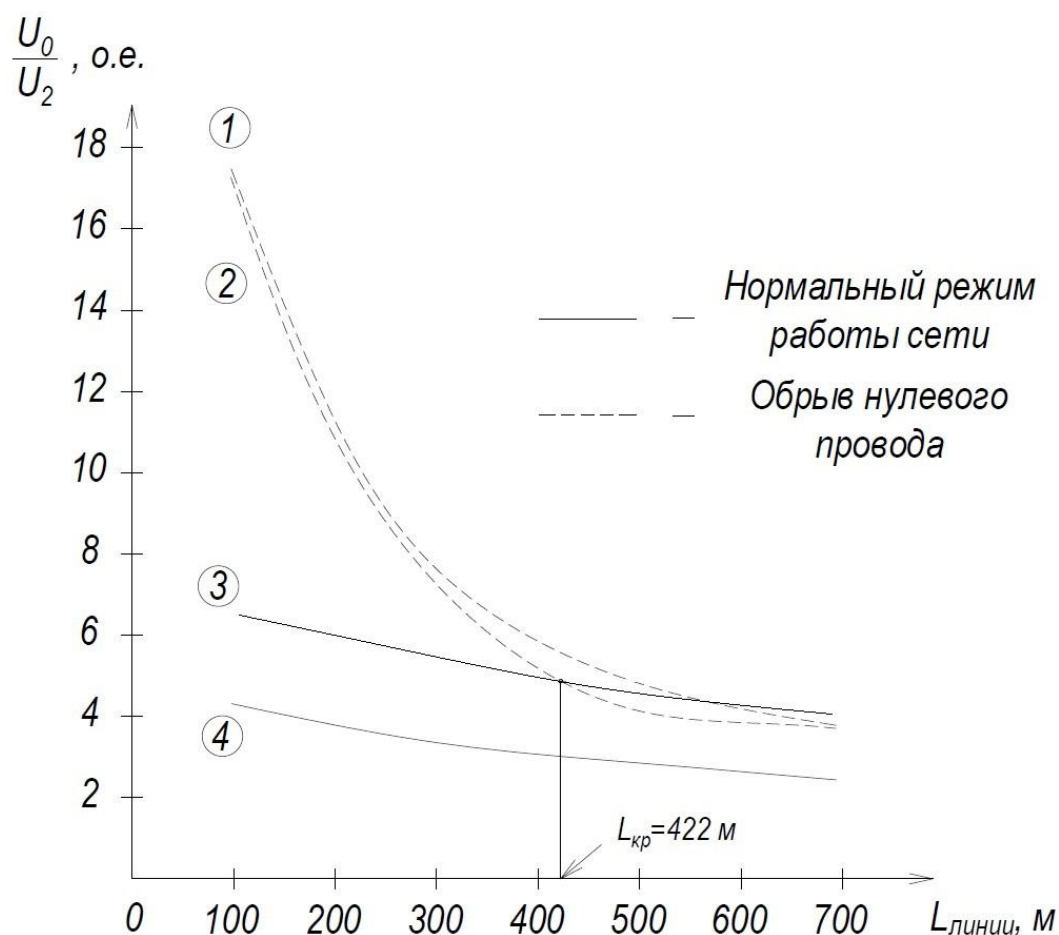


Рис. 3. Зависимости отношений  $U_0/U_2$  от длины линии при заданных параметрах

На рис. 3 пунктирной линией обозначены зависимости, полученные при моделировании обрывов нулевого провода, сплошными линиями – зависимости в нормальном режиме. Цифрами обозначены различные сочетания мощностей по фазам нагрузки, например, 1 –  $P_a=5$  кВт,  $P_b=50$  кВт,  $P_c=50$  кВт; 2 –  $P_a=45$  кВт,  $P_b=50$  кВт,  $P_c=50$  кВт; 3 –  $P_a=5$  кВт,  $P_b=5$  кВт,  $P_c=50$  кВт; 4 –  $P_a=5$  кВт,  $P_b=50$  кВт,  $P_c=50$  кВт. Точка пересечения зависимостей в нормальном и аварийном режимах позволяет определить критическую длину линии, при которой рассматриваемый критерий сохраняет свою эффективность.

**Заключение.** В ходе проведения экспериментов по выявлению критерия, который позволил бы эффективно выявлять обрывы нулевого провода, было установлено, что отношение напряжения нулевой последовательности к напряжению обратной последовательности может быть принято в качестве критерия распознавания обрывов нулевого провода. Однако этот критерий не является абсолютно эффективным, потому что при увеличении длины линии значения рассматриваемого отношения при обрывах нулевого провода накладываются на значения данного критерия в нормальных режимах. На первом этапе работы была определена критическая длина линии, при которой обнаружение обрывов нулевого проводника в простейшей линии производится без ложного сигнализирования. Было установлено, что в простейшей сети с удаленным потребителем, при заданных параметрах, данный критерий работает эффективно при длине линии примерно до 422 м.

Следует также отметить, что обрыв нулевого провода может нести вред здоровью только при значительном уровне несимметрии, создающем относительно большое напряжение между нейтральным проводником и землей. Согласно [1], это напряжение не должно превышать 50 В. Вследствие чего, необнаружение критерием обрыва нулевого провода при незначительном напряжении между нейтральным проводом и землей является допустимым с точки зрения электробезопасности, что в свою очередь может позволить увеличить длину линии, при которой критерий будет работать успешно.

#### Библиографический список

1. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – СПб.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 980 с.
2. Будзко, И.А. Электроснабжение сельского хозяйства / И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская, В.И. Сукманов. – М.: Колос, 2000. – 536 с.
3. Левин, М.С. Анализ несимметричных режимов сельских сетей 0,38 кВ / М.С. Левин. – М.: Изд-во Электричество, 1999. – 67 с.
4. Никольский, О.К. Системы обеспечения электробезопасности в сельском хозяйстве / О.К. Никольский. – М.: Изд-во «Алтай», 1977. – 192 с.
5. Мотуско, Ф.Я. Защитные устройства в электроустановках / Ф.Я. Мотуско. – М.: Энергия, 1985. – 200 с.

6. 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.

[К содержанию](#)