

УДК 621.316.1:004 + 621.311.1:004

## **КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–10/0,38 кВ**

*А.В. Хлопова, А.М. Ершов*

В статье рассмотрена компьютерная модель электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ, состоящей из электрической сети и воздушной линии напряжением 10 кВ, понижающего трансформатора, воздушной линии напряжением 380 В с сосредоточенной нагрузкой в конце, построенная в программной среде MATLAB при использовании пакета Simulink. Модель предназначена для исследования нормальных и аварийных режимов работы электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ при изменении в широких пределах её технических характеристик. Описаны направления исследований.

Ключевые слова: компьютерная модель, электрическая сеть напряжением 6–10/0,38 кВ, воздушная линия 6–10 кВ, обрывы фазных проводов.

Аналитическое исследование режимов работы электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ в различных её точках представляется сложной и трудоёмкой задачей. Это объясняется множеством возможных режимов, каждый из которых описывается своими уравнениями состояния сети [1].

В настоящее время для решения подобных задач широко используется программный комплекс MATLAB, который является мощным и универсальным средством решения задач, возникающих в различных областях человеческой деятельности [2, 3].

Пакет Simulink, поставляемый вместе с комплексом MATLAB, предназначен для интерактивного моделирования достаточно сложных систем, состоящих из стандартных блоков. Он позволяет реализовать по существу визуально-ориентированное программирование задач автоматического составления графической модели системы или устройства, составления и решения её уравнений состояния и наглядного представления результатов моделирования. Для построения функциональной блок-схемы моделируемых устройств Simulink имеет обширную библиотеку блочных компонентов и удобный редактор блок-схем. Он основан на графическом интерфейсе пользователя [4].

Программный комплекс MATLAB с пакетом Simulink предоставляет исследователю самые различные возможности, начиная от структурного (математического) представления системы и заканчивая макетированием системы в реальном времени.

Защита населения от поражений электрическим током при обрывах фазных проводов воздушных линий напряжением 6–10 кВ является одной из проблем при их эксплуатации [5, 6]. Для определения структуры устройств защиты от обрывов проводов воздушных линий нужно, с одной стороны, знать параметры сети (напряжения и токи), на которые они должны реагировать, а с другой стороны, параметры, от которых следует отстраиваться.

Исследования режимов работы электрической сети проводятся с целью анализа изменений напряжений и токов, а также их симметричных составляющих при обрывах фазных проводов воздушной линии напряжением 6–10 кВ, которые могут быть использованы для распознавания аварийных режимов работы электрической сети и построения соответствующих устройств защиты.

На рис. 1 представлена принципиальная схема трёхфазной электрической сети, состоящей из источника питания напряжением 10 кВ (например, подстанции напряжением 110/10 кВ), воздушной линии напряжением 10 кВ (ВЛ-10 кВ), понижающего трёхфазного трансформатора Т, четырёхпроводной воздушной линии напряжением 380 В (ВЛ-380 В) и нагрузки потребителей электрической энергии в конце линии.

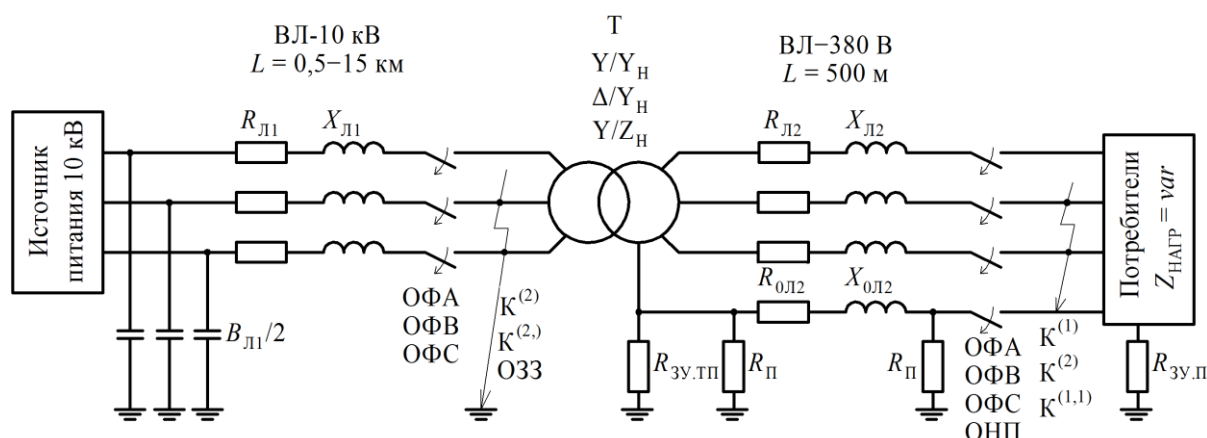


Рис. 1. Схема электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ

На схеме обозначено:  $R_{Л1}$ ,  $X_{Л1}$  и  $B_{Л1}/2$  – активное и индуктивное сопротивления, ёмкостная проводимость (показанная для удобства только с одной стороны) ВЛ-10 кВ;  $R_{Л2}$ ,  $X_{Л2}$  – активное и индуктивное сопротивления фазных проводов ВЛ-380 В;  $R_{0Л2}$ ,  $X_{0Л2}$  – активное и индуктивное сопротивление нулевого провода ВЛ-380 В;  $R_{ЗУ.ТП}$ ,  $R_{П}$ ,  $R_{ЗУ.П}$  – сопротивления заземляющих устройств трансформаторной подстанции, повторных заземлений нулевого провода ВЛ-380 В и потребителя электроэнергии;  $Y/Y_H$ ,  $\Delta/Y_H$ ,  $Y/Z_H$  – виды соединения обмоток трансформатора Т;  $Z_{НАГР} = var$  – сопротивление нагрузки потребителя, меняющееся в широких пределах как по

величине, так и по фазам; ОФА, ОФВ, ОФС – обрывы фазы, соответственно, А, В, С;  $K^{(2)}$ ,  $K^{(2)}$  и ОЗЗ – двухфазное короткое замыкание (КЗ), двухфазное КЗ на землю и однофазное замыкание на землю ВЛ-10 кВ;  $K^{(1)}$ ,  $K^{(2)}$ ,  $K^{(1,1)}$  – виды КЗ в ВЛ-380 В – однофазное, двухфазное и двухфазное КЗ на землю; ОФН – обрыв нулевого провода.

На изменения напряжений и токов в различных точках электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ с одной стороны оказывают влияние её технические характеристики:

- мощность короткого замыкания вышестоящей питающей сети;
- параметры ВЛ-10 кВ: протяжённость (0,5–20 км) и сечение используемого провода (35–95 мм<sup>2</sup>);
- мощность силовых трансформаторов напряжением 6–10/0,4 кВ (100–630 кВ·А) и схемы соединения их обмоток – «звезда/звезда с нулём», «треугольник/звезда с нулём», «звезда/зигзаг с нулём»;
- параметры ВЛ-380 В: протяжённость (до 1 км), сечение используемого провода (25–70 мм<sup>2</sup>);
- параметры заземляющих устройств силовых трансформаторов  $R_{ЗУ,ТП}$  и потребителей  $R_{ЗУ,П}$ , повторных заземлителей нулевого провода ВЛ-380 В  $R_{П}$ .

С другой стороны, на изменения напряжений и токов электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ влияют её режимы работы:

- обрывы фазных проводов ВЛ-10 кВ;
- однофазные замыкания на землю в ВЛ-10 кВ (ОЗЗ);
- двухфазные КЗ  $K^{(2)}$  и двухфазные КЗ на землю  $K^{(2)}$  в ВЛ-10 кВ;
- степень загрузки силовых трансформаторов напряжением 6–10/0,4 кВ;
- несимметрия электрических нагрузок  $Z_{НАГР}$  в сети напряжением 380 В;
- обрывы фазных и нулевого проводов ВЛ-380 В;
- одно- и двухфазные КЗ ( $K^{(1)}$ ,  $K^{(2)}$ ), а также двухфазные КЗ на нулевой провод  $K^{(1,1)}$ .

Все рассмотренные технические параметры электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ и возможные режимы её работы должны быть заложены в компьютерную модель для получения объективных результатов исследований.

В программном комплексе MATLAB с использованием пакета Simulink построена компьютерная модель электрической сети напряжением 10/0,38 кВ (рис. 2). За основу взята разработанная ранее модель электрической сети напряжением 0,38 кВ, описанная в [7].

Для построения модели используются стандартные блоки библиотеки Simulink:

- Three-Phase Source – моделирует трёхфазный источник питания;

- Three-Phase PI Section Line и PI Section Line – моделирует трёхфазную и однофазную линию с сосредоточенными параметрами;
- Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings) – моделирует трёхфазный двухобмоточный трансформатор с различной конфигурацией обмоток и геометрией магнитопровода;
- Parallel RLC Load – моделирует нагрузочную ветвь;
- Three-Phase Fault – моделирует различные виды короткого замыкания в трёхфазной цепи;
- Breaker – моделирует обрыв фазы линии;
- Series RLC Branch – моделирует последовательную RLC-цепь (в данной модели используется для моделирования активного сопротивления различного рода заземляющих устройств);
- Powergui – является инструментом графического интерфейса.

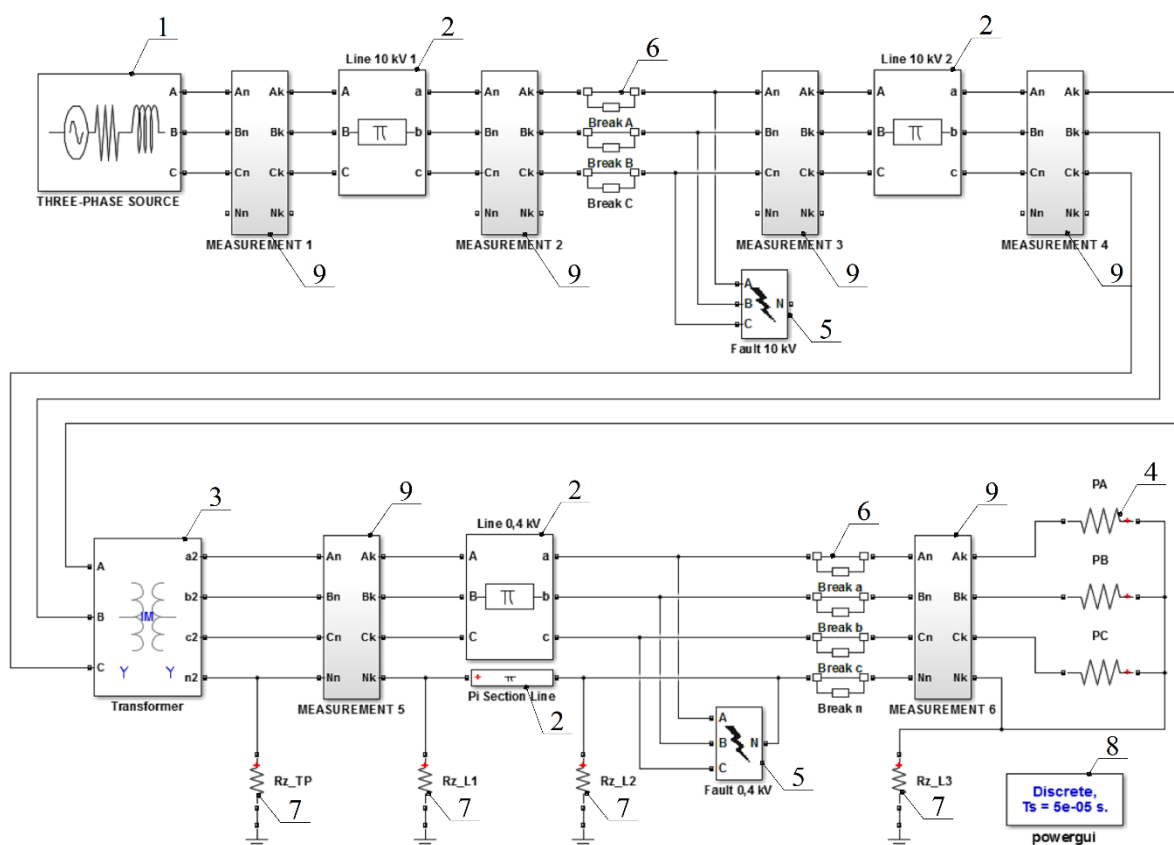


Рис. 2. Компьютерная модель электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ

Также в модели использованы дополнительные подсистемы 9, объединяющие в себе стандартные измерительные блоки, позволяющие проводить измерения напряжений и токов и их симметричных составляющих как по величине, так и по фазе в различных точках сети.

Параметры, задаваемые в блоках модели, рассчитаны по известным методикам [7].

Данная компьютерная модель 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. Такими режимами могут быть обрывы проводов как ВЛ-10 кВ, так и ВЛ-380 В, различного вида КЗ и др.

В компьютерной модели заключены возможности изменения в широких пределах параметров электрической сети напряжением 6–10/0,38 кВ (см. табл.).

Таблица

Параметры моделируемой сети

Элемент схемы	Параметр	Величина
Источник	Мощность короткого замыкания	50–300 МВ·А
	Напряжение	10 кВ
Воздушная линия напряжением 10 кВ	Длина линии	0,5–20 км
	Сечение проводов	35–95 мм <sup>2</sup>
	Материал провода	Алюминий со стальным сердечником
Трансформатор напряжением 10/0,4 кВ	Мощность	100–630 кВ·А
	Схема соединения обмоток	Y/Y <sub>H</sub> , Δ/Y <sub>H</sub> , Y/Z <sub>H</sub>
Воздушная линия напряжением 380 В	Длина линии	До 1 км
	Сечение проводов	25–70 мм <sup>2</sup>
	Материал провода	Алюминий со стальным сердечником
Сопротивления заземляющих устройств	Трансформаторной подстанции	4 Ом
	Повторное заземление нулевого провода ВЛ	30 Ом
	Потребителя	10–30 Ом
Мощность потребителя	В процентах от мощности трансформатора 10/0,4 кВ	0–100 %
Сопротивление нагрузки Z <sub>НАГР</sub>	Изменение по фазам	0–100 %

Для упрощения моделирования в рабочей среде MATLAB в редакторе М-файлов написан программный код, который управляет запусками модели, меняя в ней необходимые параметры электрической сети. По окончании моделирования каждого режима, результаты сохраняются в рабочее

пространство MATLAB, затем автоматически запускается следующий режим. Так, по очереди, программа запускает все заданные режимы, а результаты измерений каждого из них записываются в файл Microsoft Excel, в котором они представлены в удобном для анализа виде. Таким образом, данный код позволяет быстро промоделировать и записать результаты исследований множества режимов работы моделируемой сети при различном сочетании её технических характеристик.

Предполагается проведение комплексных взаимодополняющих исследований на компьютерной и физической моделях, а также в опытной электрической сети напряжением 10/0,38 кВ [8]. Глубина и объем исследований на компьютерной модели качественно и количественно превосходят возможные аналогичные исследования в реальной действующей сети. Но это не говорит о том, что можно отказаться от исследований в действующих сетях. Исследования в лаборатории на физической модели, параметры которой будут определены с использованием теории подобия, позволят расширить понимание рассматриваемых несимметричных режимов электрической сети.

**Заключение.** Разработана компьютерная модель, позволяющая проводить исследования различных режимов работы электрической сети напряжением 6–10/0,38 В при изменении её параметров в широком диапазоне.

Написан программный код, упрощающий моделирование и запись результатов множества измерений, необходимых для анализа результатов исследования электрической сети.

Исследования позволяют, во-первых, определить возможные диапазоны изменения напряжений и токов как при нормальном режиме работы сети, так и при обрывах фазных проводов ВЛ-10 кВ, во-вторых, выбрать критерии, четко характеризующие разные режимы работы электрической сети, в-третьих, сформулировать требования к устройствам определения этих режимов.

#### Библиографический список

1. Тынянский, В.Г. Распознавание режимов работы воздушных линий напряжением 0,4 кВ и электроприёмников: дис. ... канд. техн. наук / В.Г. Тынянский. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2005. – 244 с.
2. Ануфриев, И.Е. Matlab 7. / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
3. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
4. Черных, И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / И.В. Черных; под общ. ред. канд. техн. наук В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.

5. Электробезопасность. Теория и практика: учебное пособие для вузов / П.А. Долин, В.Т. Медведев, В.В. Крючков, А.Ф. Монахов; под ред. В.Т. Медведева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 280 с.

6. Григорьев, А.В. Защита сельских электросетей / А.В. Григорьев, А.И. Селивахин, В.И. Сукманов. – Алма-Ата: Кайнар, 1984. – 128 с.

7. 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.

8. 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.

[К содержанию](#)