



## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ТЯГОВОЙ НАГРУЗКИ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

**В.И. Нагай, Б.Е. Дынькин, П.С. Киреев, А.В. Украинцев,** Россия, г. Новочеркасск, ЮРГПУ(НПИ)

**И.В. Нагай, С.В. Сарры,** Россия, г. Новочеркасск, ЮРГПУ(НПИ) ООО «НПП «РЕЛДОН»

**В.В. Нагай,** Россия, г. Новочеркасск, ООО «НПП «РЕЛДОН»

**А.А. Шурупов, Н.А. Дони,** Россия, г. Чебоксары, ООО «НПП «ЭКРА»

*Ключевые слова:* релейная защита, прямая и обратная последовательность токов, тяговая нагрузка.

### **Введение**

Электрифицированная железная дорога переменного тока (ЭЖДПТ) является специфическим несимметричным нелинейным потребителем с переменной однофазной нагрузкой. При этом имеет место существенное отличие от других потребителей, заключающееся в том, что ЭЖДПТ является протяженным приемником электрической энергии, и питание ее тяговых подстанций (ТПС), как правило осуществляется от нескольких узлов энергосистемы [1 - 9]. Это приводит к тому, что пункты питания энергосистем, имеющие различные внешние характеристики, параллельно работают на систему тягового электроснабжения.

### **Постановка задачи**

Влияние тяговой нагрузки на режимы работы электрических сетей внешнего электроснабжения, к которым она подключена, определяется системами тягового электроснабжения (СТЭ) и системами электроснабжения нетяговых (промышленных и коммунальных) потребителей. Отличительной особенностью является значительная единичная мощность электропоездов, составляющая до 15-20 МВт для тяжеловесных поездов, а также нахождение на одной межподстанционной зоне нескольких электропоездов с суммарной мощностью до 35-45 МВт. Перемещение поездов внутри зоны, с одной зоны на другую ведет к изменению нагрузки в общем случае от нуля до 10–15 МВт,



что сопровождается изменением не только фазных токов, но и их симметричных составляющих и особенно токов обратной последовательности, которые широко используются при построении измерительных органов релейной защиты (РЗ). Это же относится и к приращениям токов прямой и обратной последовательностей, которые используются в качестве информационного признака аварийных процессов (коротких замыканий), что требует их уточнения при построении РЗ электрических сетей при наличии в них тяговой нагрузки.

### ***Математическое моделирование режимов с тяговыми подстанциями***

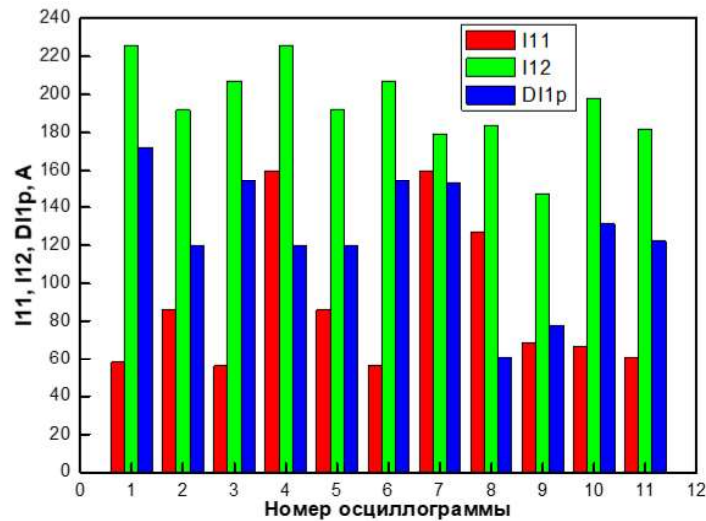
Авторами разработана математическая модель электропитания СТЭ, состоящая из шести тяговых подстанций, подключенных к двухцепной воздушной линии напряжением 110 кВ и выполненная в среде визуального моделирования *Simulink MATLAB*. Электротяговая сеть состоит из участков, разделенных нейтральными вставками. Все участки контактной сети имеют двустороннее питание от тяговых подстанций. Тяговые подстанции включены в сеть по схеме «встречного» винта. В модели на каждый участок включена эквивалентная нагрузка, имитирующая работающие электровозы и междуфазные короткие замыкания (КЗ) на стороне 27,5 кВ любой тяговой подстанции. В процессе моделирования имеется возможность исследовать и наблюдать визуально изменение протекающих через тяговые подстанции и участки питающих ЛЭП токов и величины напряжений при изменении тяговой нагрузки на любой зоне, при КЗ и при одновременном действии КЗ и нагрузки на любой межподстанционной зоне.

### ***Экспериментальные исследования***

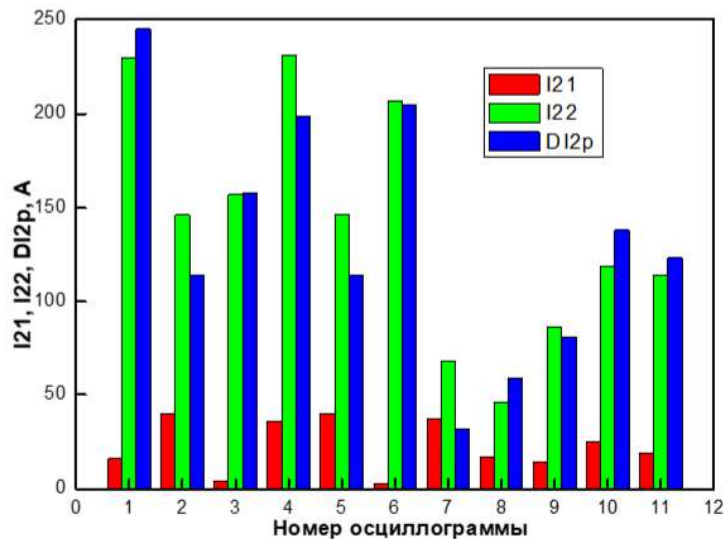
Для оценки адекватности предложенной математической модели проводились экспериментальные исследования на подстанции с автотрансформаторами 2x125 МВА, основной нагрузкой которой является промышленная нагрузка и тяговая нагрузка железной дороги, в том числе ТПС напряжением 110/35/27,5 кВ и трехобмоточными трансформаторами 2x40 МВА. При проведении экспериментов была предусмотрена запись сигналов с регистратора аварийных событий, установленных на трансфор-



маторах. Пуск регистратора предусматривался при приращении модулей фазных токов на заданное значение. Во всех случаях (11 экспериментов) тяговая нагрузка оставалась несимметричной и при этом отмечалось симметрирующее действие нагрузки промышленных потребителей, а также уменьшение высших гармонических составляющих в фазных токах, токах прямой и обратной последовательностей при увеличении мощности тяговой нагрузки (рис. 1).



*a*



*б*

Рис. 1. Модули токов прямой (*a*) и обратной (*б*) последовательностей до момента изменения тяговой нагрузки, в период ее изменения и приращения модулей тока прямой и обратной последовательностей в экспериментах 1-11



На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $I_{11}$ ,  $I_{12}$  – токи прямой последовательности до и после изменения нагрузки;  $\Delta I_{1p}$  – приращение тока прямой последовательности;  $I_{21}$ ,  $I_{22}$ ,  $\Delta I_{2p}$  – токи обратной последовательности до, после изменения нагрузки и его приращение.

### ***Заключение***

В результате проведенных экспериментальных исследований можно отметить следующее: токи на стороне 110 кВ могут достигать значений до 200-240 А; токи обратной последовательности составляют (20-90)% тока прямой последовательности; отмечается значительное содержание высших гармонических составляющих в фазных токах, токах прямой и обратной последовательности, что обусловлено несимметричным и нелинейным характером тяговой нагрузки. Причем значения высших гармонических составляющих снижаются до уровней 10-15% при увеличении мощности тяговой нагрузки.

Уточнение параметров математической модели на основе проведенных экспериментальных исследований позволило получить сопоставимые результаты по первым гармоническим составляющим токов и напряжений с экспериментальными данными в реальной сети 110 кВ. Несимметрия токов и напряжений в сети внешнего электроснабжения, вызываемая однофазными тяговыми нагрузками и полученная с использованием имитационного моделирования в натурном эксперименте и на модели были сопоставимы.

Изменение величины фазного тока в наиболее нагруженной фазе питающей ВЛ 110 кВ достигает максимальных величин за небольшой (10-15 сек) промежуток времени. В подавляющем числе экспериментов приращения тока обратной последовательности имеют сопоставимые значения с приращением тока прямой последовательности и составляют (0,9-1,63) $\Delta I_1$ .

Указанные информационные признаки могут быть использованы для уточнения методик расчета параметров измерительных органов и разработке новых алгоритмов устройств релейной защиты воздушных линий и элементов подстанции, питающих тяговую нагрузку.



## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р57670 – 2017 Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров. – М: Стандартинформ, 2017.
2. СП 224.1326000.2014 Тяговое электроснабжение железной дороги. УТВЕРЖДЕН пр. Минтранса России от 02.12.2014 г., №330. Дата введения 2014-12-01. Введен впервые.
3. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
4. Электроснабжение железных дорог/ Э.В. Тер-Оганов, А.А. Пышкин. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2014. – 432 с.
5. Тамазов А.И. Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными тяговыми нагрузками- М.: Транспорт, 1965. – 235 с.
6. Фигурнов Е.П. Защита электротяговых сетей переменного тока от коротких замыканий. - М.: Транспорт, 1979. – 160 с.
7. Фигурнов Е.П. Релейная защита устройств электроснабжения железных дорог. - М.: Транспорт, 2006. – 215 с.
8. Дынькин Б.Е. Защита тяговых сетей переменного тока при разземлении опор контактной сети. – Хабаровск: ДВГУПС. – 1999. – 170 с.
9. Дынькин Б.Е., Дынькин П.Б., Миронюк Т.В. Режимы работы защит тяговых сетей переменного тока и системы внешнего электроснабжения железнодорожного транспорта. // Кибернетика энергетических систем: науч. тр. семинара: Южно-Росс. гос. политехн. ун-т (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск, 2018. – С. 292-299.

**Авторы:**

**Нагай Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические станции и электроэнергетические системы» (ЭСиЭЭС) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова. E-mail: nvi53@mail.ru.

**Нагай Иван Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, директор ООО НПП «РЕЛДОН». E-mail: nagayiv@mail.ru.

**Нагай Владимир Владимирович**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник/ начальник отдела РЗ и ПА ООО НПП «РЕЛДОН»/ филиал ООО «Энерго-Юг» «Южэнергосетьпроект». E-mail: wwn\_1978@mail.ru.

**Сарры Сергей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические станции и электроэнергетические



системы» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, ООО НПП «РЕЛДОН». E-mail: sv@sarry.ru.

**Дынькин Борис Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы» (ЭСиЭЭС) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова. E-mail: dypkin1949@yandex.ru.

**Киреев Павел Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова. E-mail: kireevps@yandex.ru.

**Украинцев Александр Валерьевич**, старший преподаватель кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова. E-mail: kireevps@yandex.ru.

**Дони Николай Анатольевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, директор по науке - заведующий отделом РЗА ООО НПП «ЭКРА». E-mail: doni\_na@ekra.ru.

**Шурупов Алексей Александрович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом разработки подстанционного оборудования ООО НПП «ЭКРА». E-mail: ekra4@ekra.ru.