

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.331

DOI: 10.18324/2077-5415-2017-2-47-53

Моделирование нормальных и аварийных режимов систем тягового электроснабжения, оснащенных установками продольной компенсации

Ю.Н. Булатов^{1 a}, В.П. Закарюкин^{2 b}, А.В. Крюков^{2,3 c}, Е.А. Алексеенко^{4 d}¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия²Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия³Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия⁴Восточно-Сибирская дирекция по энергообеспечению Трансэнерго ОАО РЖД, ул. Образцова 20, Иркутск, Россия^abulatovyura@yandex.ru, ^bzakar49@mail.ru, ^cand_kryukov@mail.ru, ^dalev_ia@mail.ru

Статья поступила 18.02.2017, принята 23.03.2017

Применение установок продольной емкостной компенсации (УПК) существенно снижает сопротивление тяговой сети, что приводит к росту токов короткого замыкания. Для решения задач проектирования и настройки релейной защиты систем тягового электроснабжения (СТЭ), оснащенных установками продольной емкостной компенсации, требуется разработка методов и алгоритмов определения аварийных режимов. Универсальный метод определения аварийных режимов в СТЭ может быть реализован с помощью применения фазных координат. В его основу положено представление многопроводных линий и многообмоточных трансформаторов в виде решетчатых схем замещения из RLC-элементов, соединенных по схемам полных графов. В статье представлены результаты исследований, направленных на анализ влияния установок продольной емкостной компенсации на токи короткого замыкания в системах электроснабжения железных дорог. В качестве рабочих инструментов использованы программные комплексы Fazonord и MatLab. Имитационное моделирование режимов системы электроснабжения реального участка одной из железных дорог показало, что применение установок продольной компенсации позволяет значительно увеличить скорость движения поездов. Однако если быстродействующая защита УПК выведена из работы, то в тяговой сети многократно возрастают токи короткого замыкания, и возникают значительные перенапряжения, приложенные к выводам установки. В расчетном примере величина перенапряжений достигала 23 кВ, что в реальных условиях может привести к пробоем конденсаторов УПК. Применение защиты, шунтирующей УПК на разрядный контур, позволяет существенно снизить токи, протекающие через установку, и ограничить перенапряжения.

Ключевые слова: электроснабжение железных дорог; продольная емкостная компенсация; аварийные режимы.

Modeling of normal and emergency modes of traction power systems equipped with series capacity installations

Yu.N. Bulatov^{1 a}, V.P. Zakaryukin^{2 b}, A.V. Kryukov^{2,3 c}, E.A. Alekseenko^{4 d}¹Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia²Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevskiy St., Irkutsk, Russia³Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia⁴Eastern Siberian Power Supply Directorate of TransEnergo, JSC RZD, 20, Obratsov St., Irkutsk, Russia^abulatovyura@yandex.ru, ^bzakar49@mail.ru, ^cand_kryukov@mail.ru, ^dalev_ia@mail.ru

Received 18.02.2017, accepted 23.03.2017

Series capacity installations (SCI) give significant decrease of tractive network impedance and bring to growth of short-circuit currents. To solve the problems of designing and adjusting the relay protection of traction power systems (TPS) equipped with series capacity installations, development of methods and algorithms for determining emergency conditions is required. A universal method for determining emergency modes in TPS can be realized by applying phase coordinates. It is based on the representation of multi-wire lines and multi-winding transformers in the form of lattice replacement circuits from RLC-elements connected by schemes of complete graphs. The article presents the results of studies aimed at analyzing the effect of series capacity installations on short-circuit currents in power supply systems of railways. The Fazonord and MatLab software complexes were used as working tools. Simulation modeling of power supply system modes of a real section of one of the railways showed that the use of series capacity installations makes it possible to increase significantly the speed of train movement. However, if the high-speed protection of the SCI is removed from operation, the short-circuit currents significantly increase in the traction network, and there is considerable overvoltage in series capacity installations. In the calculation example, the surge voltage reached 23 kV which in real conditions can lead to the breakdown of the SCI capaci-

tors. The use of protection, bypassing the SCI on the discharge circuit, can significantly reduce the currents flowing through the installation and restrict overvoltage.

Keywords: railway electrical power supply; series capacity installations; emergency modes.

Введение

В системах тягового электроснабжения железных дорог (СТЭ) переменного тока широко применяются установки продольной емкостной компенсации (УПК) [1]. Основная цель их применения состоит в повышении уровней напряжения в тяговой сети [5]. За счет этого можно увеличить скорость движения поездов и пропускную способность железной дороги, а также снизить потери мощности в тяговой сети (ТС).

Отрицательным эффектом применения УПК является рост токов короткого замыкания (КЗ) из-за снижения сопротивления тяговой сети. Для решения задач проектирования и настройки релейной защиты ТС, оснащенных установками продольной емкостной компенсации, требуется разработка методов и алгоритмов определения аварийных режимов. Универсальный метод определения таких режимов может быть реализован с помощью применения фазных координат [6–8]. В его основу положено представление многопроводных линий и многообмоточных трансформаторов в виде решетчатых схем замещения из RLC-элементов, соединений по схемам полных графов. Главная идея получения решетчатой схемы заключается в переводе уравнений, описывающих режим, в формат, соответствующий первому закону Кирхгофа, с интерпретацией слагаемых как токов, протекающих по некоторым новым ветвям. Такая концепция позволяет получить полную взаимосвязанную схему замещения многопроводной системы.

В статье представлены результаты исследований, направленных на разработку методик расчетов нормальных и аварийных режимов СТЭ с установками продольной емкостной компенсации. В качестве рабочего инструмента использованы программные комплексы (ПК) Fazonord и MatLab [7; 8].

Результаты моделирования на основе программного комплекса Fazonord. В программном комплексе Fazonord УПК моделируются с помощью RLC-

элементов, включаемых в соответствующие места расчетной схемы. Для анализа влияния УПК выбраны две схемы включения установок, одна из них представлена на рис. 1.

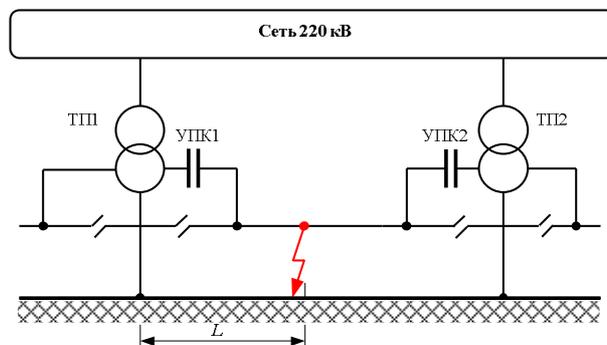


Рис. 1. Структурная схема СЭЖД

Для расчетов взят продольный профиль реального участка железной дороги, имеющий значительные протяженные уклоны до 17 ‰. На рис. 2 изображен профиль расчетного полигона, где ромбиками показано расположение тяговых подстанций. Межподстанционные зоны (МПЗ) ТП1 – ТП2 и ТП2 – ТП3 оснащены УПК по схеме на рис. 1, остальные МПЗ не имеют установок продольной компенсации. Емкость батарей УПК 843 мкФ, сопротивление $-j3,78$ Ом.

Токовый профиль поезда показан на рис. 3. Наличие значительных уклонов в МПЗ ТП2 – ТП3 (205...254 км) приводит к большим поездным токам при сравнительно небольших скоростях движения по участку.

На участке пути от 230 до 220 км для нечетных поездов и на участке от 205 до 218 км для четных поездов скорость движения ограничена значением 30 км/ч ввиду большого уклона 17‰; на остальных участках скорость движения составляет 50 км/час.

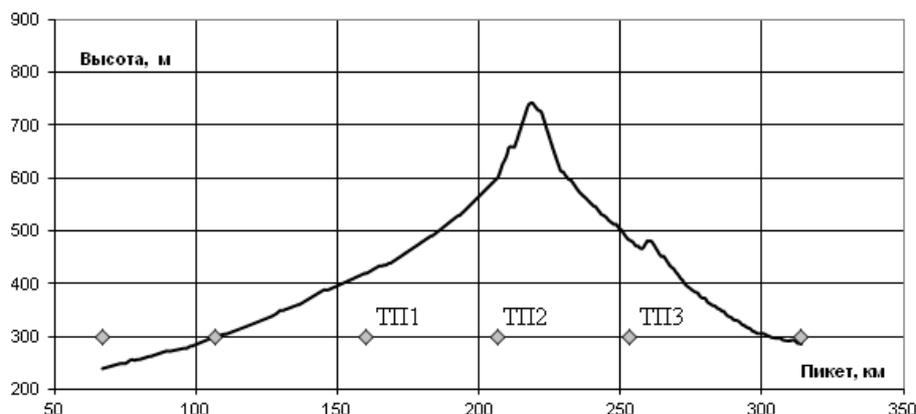


Рис. 2. Продольный профиль расчетного участка

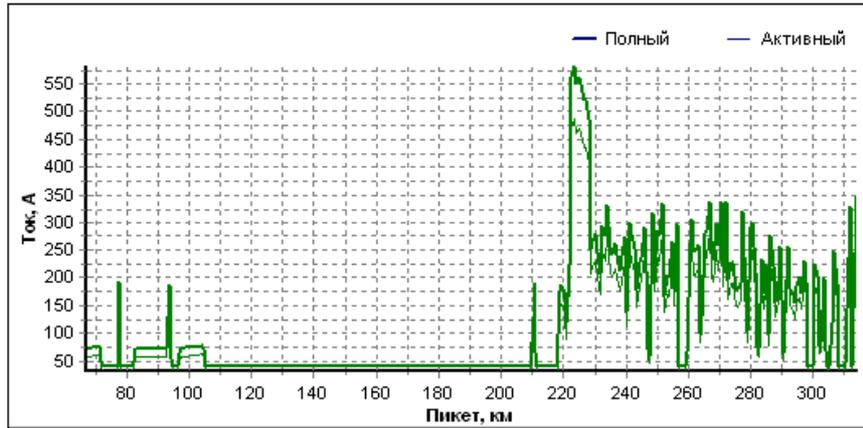


Рис. 3. Токвый профиль поезда массой 4 132 т

Моделирование программным комплексом Fazonord проведено в двух вариантах: при включенных и отключенных установках продольной компенсации. Результаты моделирования показали, что при включенных УПК обеспечивается пропуск нечетных поездов массой 4 100 тонн с интервалами 30 мин без ограничения количества поездов на участке. При отключении УПК возможен пропуск с такими же интервалами только пакета из пяти поездов (рис. 4, 5). Графики изменения во времени напряжения на токоприемнике первого поезда и активной мощности, потребляемой локомотивом, для первого варианта приведены на рис. 6.

Таблица 1

Результаты расчета токов КЗ при замыкании контактной подвески на рельс

L, км	Токи, кА		Отношение $I_k^{(+)} / I_k^{(-)}$
	УПК включены	УПК отключены	
0	14,27	4,94	2.89
7	7,92	3,88	2.04
17	3,88	2,58	1.50
39	4,98	2,97	1.68
49	14,15	4,96	2.85

Примечание. $\lambda = \frac{I_k^{(+)}}{I_k^{(-)}}$, где $I_k^{(+)}$ — ток КЗ при включенной УПК; $I_k^{(-)}$ — ток КЗ при отключенной УПК.

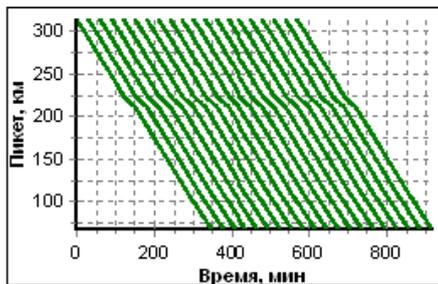


Рис. 4. Графики движения поездов при включенных УПК

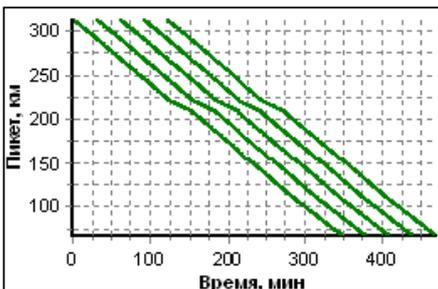


Рис. 5. Графики движения поездов при отключенных УПК

Расчеты токов КЗ с помощью комплекса Fazonord проводятся путем установки заземляющих RL-элементов в нужных узлах. Результаты расчетов токов через УПК при КЗ в тяговой сети МПЗ ТП1 – ТП2 сведены в табл. 1 и проиллюстрированы на рис. 7.

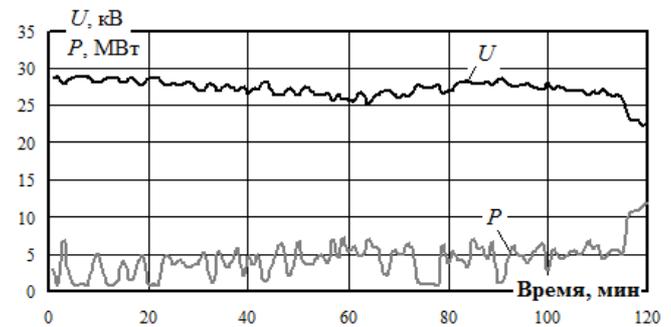


Рис. 6. Изменение во времени напряжения на токоприемнике первого поезда и активной мощности, потребляемой локомотивом

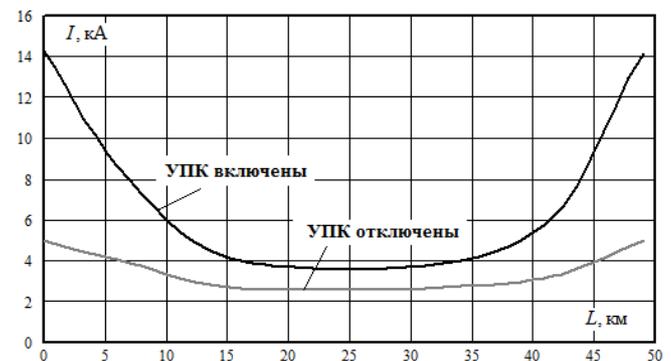


Рис. 7. Зависимость тока КЗ от расстояния между точкой КЗ и ТП1

Полученные результаты свидетельствуют о том, что уменьшение сопротивления ТС за счет включения УПК приводит к существенному росту (в полтора-три раза) токов короткого замыкания. Эти значения соответствуют ситуации отсутствия быстродействующей защиты, шунтирующей УПК при КЗ [1; 3]. Тем не менее, представленные результаты могут быть полезными при проектировании и настройке устройств защиты УПК, а также систем резервирования, которые должны срабатывать при отказе этих устройств.

УПК могут монтироваться в рассечку фидеров контактной сети, а также в рельсовом фидере. Для анализа влияния мест установки УПК на величину токов КЗ проведено моделирование аварийных режимов схемы СТЭ, представленной на рис. 8. Результаты расчетов токов КЗ через УПК сведены в табл. 2 и проиллюстрированы на рис. 9–11. При моделировании учитывалось сопротивление разрядного контура, включенного последовательно с конденсаторами УПК [2]. Этот контур был образован параллельно соединенными резистором и дросселем. Параметры этих элементов приняты, в соответствии с рекомендациями работы [2], равными: $R = 1 \text{ Ом}$; $L = 0,6 \text{ мГн}$. Расчеты проведены для 13 вариантов, представленных в табл. 2; при этом варьировались места установки УПК и ее сопротивление.

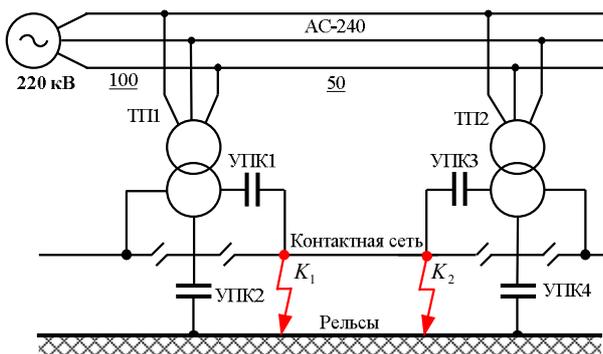


Рис. 8. Схема участка СЭЖД

Таблица 2

Результаты моделирования

Включены	$X_C, \text{ Ом}$	$Z, \text{ Ом}$	$I_{k1}, \text{ кА}$	$I_{k2}, \text{ кА}$
Нет	0,00	0,00	5,47	5,11
УПК1	1,875	$0,034 - j1,693$	7,12	5,18
УПК1	2,5	$0,034 - j2,318$	8,11	5,21
УПК1	3,75	$0,034 - j3,568$	11,57	5,28
УПК3	1,875	$0,034 - j1,693$	5,53	6,41
УПК3	2,5	$0,034 - j3,568$	5,56	7,14
УПК3	3,75	$0,034 - j1,693$	5,61	9,46
УПК1+УПК3	1,875	$0,034 - j1,693$	7,17	6,47
УПК1+УПК3	2,5	$0,034 - j2,318$	8,17	7,22
УПК1+УПК3	3,75	$0,034 - j3,568$	11,62	9,56
УПК2	1,875	$0,034 - j1,693$	7,12	5,18
УПК2	2,5	$0,034 - j2,318$	8,1	5,21
УПК2	3,75	$0,034 - j3,568$	11,54	5,27

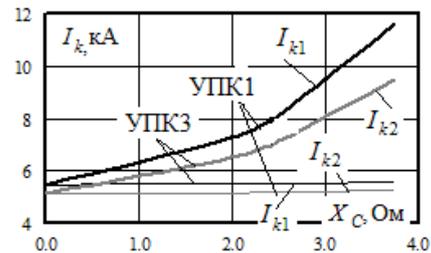


Рис. 9. Зависимости токов КЗ от сопротивления УПК при поочередном включении УПК1 и УПК3

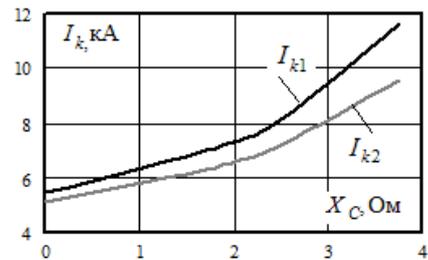


Рис. 10. Зависимости токов КЗ от сопротивления УПК при одновременном включении УПК1 и УПК3

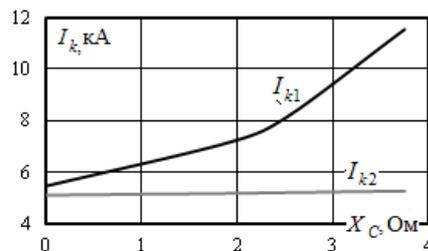


Рис. 11. Зависимости токов КЗ от сопротивления УПК при включении УПК2

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. При снижении суммарного реактивного сопротивления тяговой сети увеличение сопротивления УПК приводит к росту токов КЗ.
2. Место установки УПК практически не влияет на величину токов КЗ.

Моделирование переходных процессов с помощью системы MatLab. Моделирование переходных процессов проведено на основе пакета SimPowerSystem системы MatLab. Для анализа переходных процессов выполнено моделирование режимов КЗ при консольном питании контактной сети. При этом схема, показанная на рис. 8, преобразуется к виду, представленному на рис. 12.

На рис. 13 показана схема исследуемой модели в MatLab, состоящая из источника, моделирующего систему (блок System), ЛЭП длиной 100 км (блок Line), двухобмоточного трансформатора 220/27,5 кВ мощностью 40 МВА (блок Transformer) и короткозамыкателя (блок Fault), с помощью которого моделируются КЗ между контактной подвеской и рельсами и его отключение в заданный момент времени.

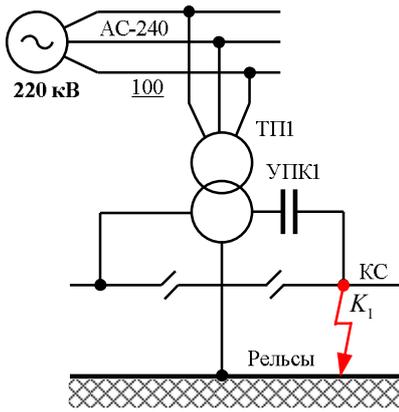


Рис. 12. Схема включения УПК

В качестве УПК используется емкость 1 699 мкФ (сопротивление 1,875 Ом), последовательно с которой, для ограничения перенапряжения на УПК и тока, протекающего через УПК при коротком замыкании, подключаются резистор R сопротивлением 1 Ом и реактор индуктивностью $L = 0,6$ мГн.

При моделировании учитывалась работа защиты УПК от перенапряжений и больших токов, шунтирующая через 1 мс УПК на разрядный контур, состоящий из резистора и реактора. Затем через 0,5 с срабатывает релейная защита подстанции и отключает КЗ.

Результаты расчетов токов КЗ через УПК сведены в табл. 3 и проиллюстрированы на рис. 14–17.

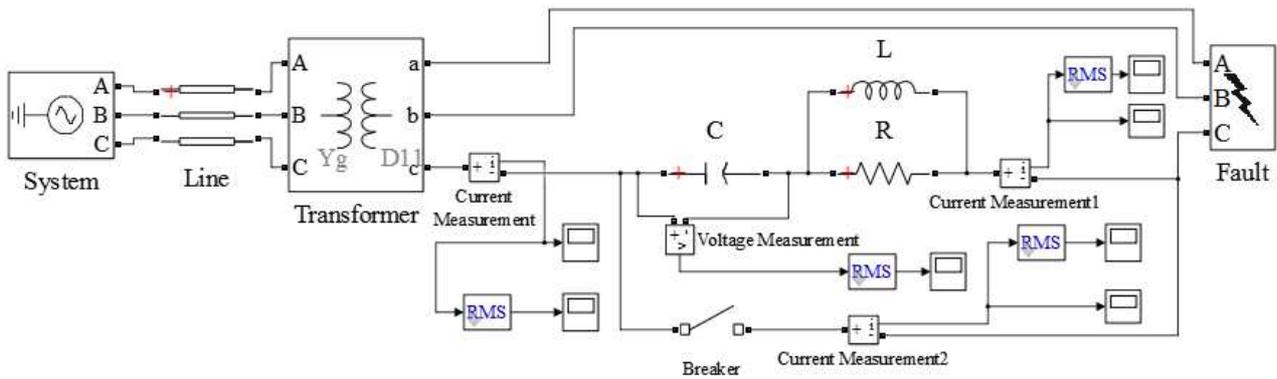


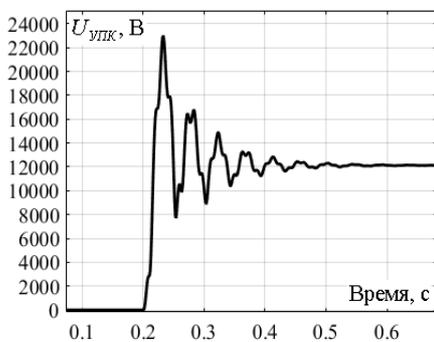
Рис. 13. Схема исследуемой модели в MatLab

Таблица 3

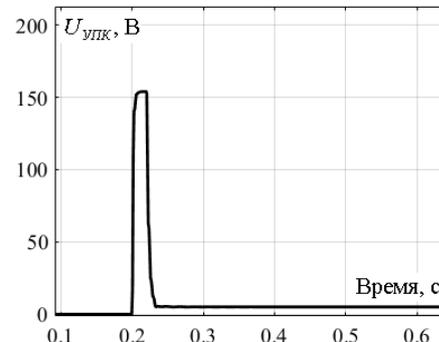
Результаты моделирования

Режим работы	Ударный ток КЗ $i_{уд}, кА$	Установившийся периодический ток КЗ $I_k, кА$
УПК не подключено	9,19	$\frac{4,65}{4,66}$
УПК подключено без шунтирования	13,74	$\frac{6,47}{6,47}$
УПК шунтировано на разрядный контур	ток через УПК	1,47 / 0,003
	ток через шунтирующий выключатель	9,25 / 4,65

Примечание. В числителе результаты, полученные в MatLab, в знаменателе — в ПК Fazonord.



а)



б)

Рис. 14. Осциллограммы изменения действующих значений напряжений на УПК при КЗ: а — без применения шунтирующего разрядного контура; б — с применением шунтирующего контура

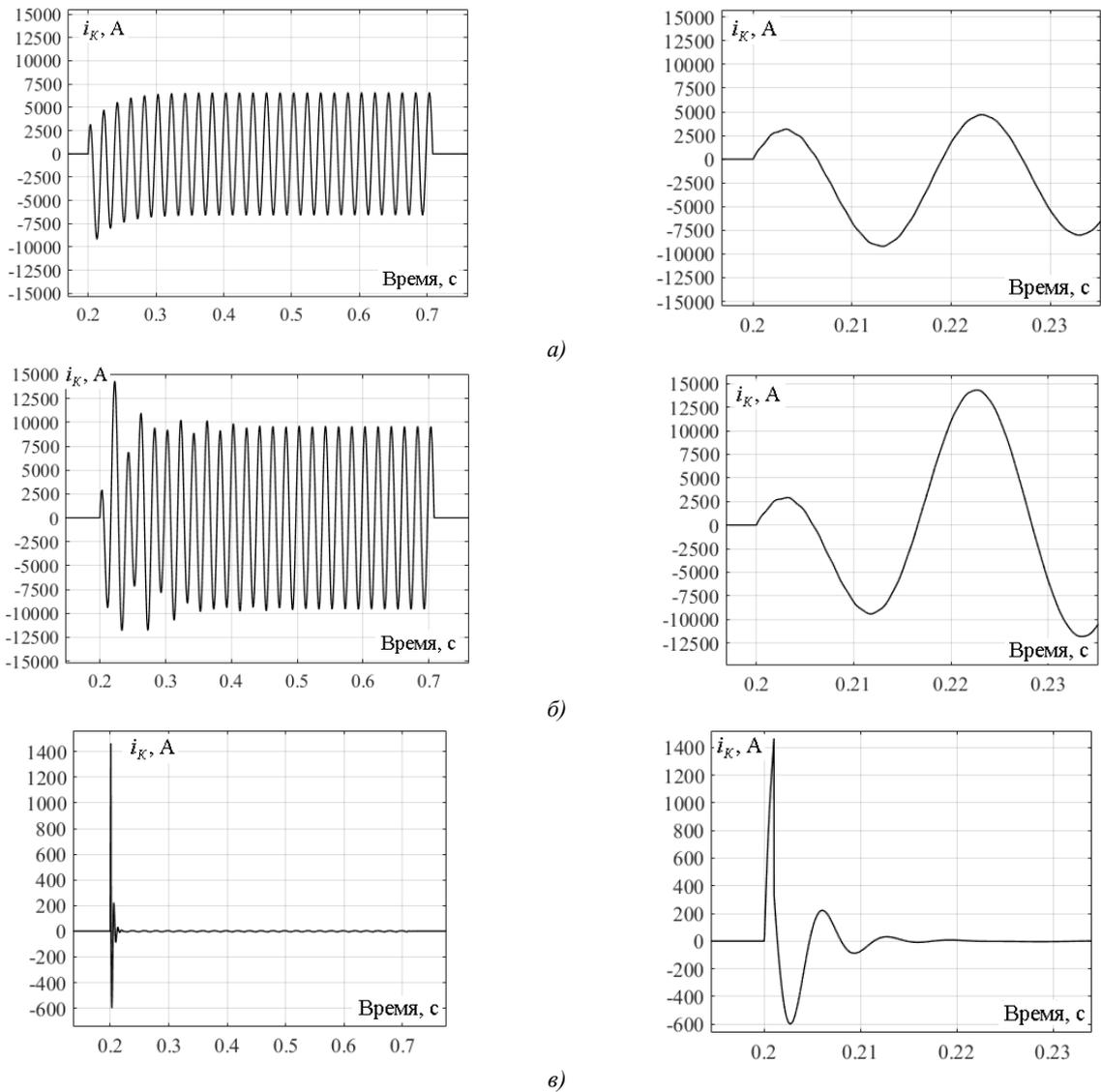


Рис. 15. Мгновенные значения токов конденсаторной батареи при КЗ: а — без подключения УПК; б — с УПК без шунтирования; в — УПК шунтировано на разрядный контур

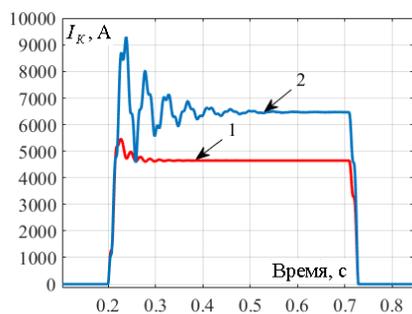


Рис. 16. Осциллограммы изменения действующих значений токов при КЗ: 1 — без подключения УПК; 2 — УПК без шунтирования

Рис. 14 свидетельствует о том, что при КЗ возникают значительные перенапряжения, которые ограничиваются шунтирующим разрядным контуром.

На рис. 15 представлены осциллограммы мгновенных значений токов, протекающих через УПК при коротком замыкании, возникающем в момент времени 0,2 с и отключаемом релейной защитой через 0,5 с.

На рис. 16 показаны осциллограммы действующих значений токов, протекающих через УПК при КЗ.

На рис. 17 показана осциллограмма действующего значения тока, протекающего через конденсаторную батарею при шунтировании на разрядный контур.

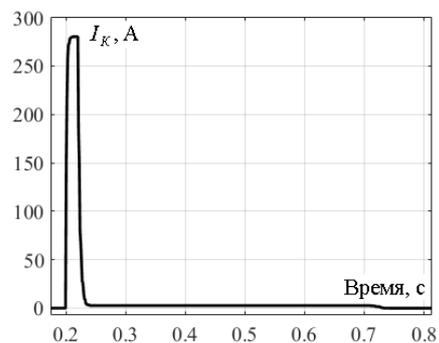


Рис. 17. Осциллограмма изменения действующего значения тока, протекающего через шунтированный на разрядный контур УПК при КЗ

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Результаты определения токов КЗ в комплексе Fa-zopord и с помощью системы MatLab совпадают, что свидетельствует об адекватности моделирования.

2. Применение быстродействующей защиты, шунтирующей конденсаторную батарею на разрядный контур, позволяет существенно снизить токи, протекающие через конденсаторы УПК, и ограничить перенапряжения.

Заключение

Предложенная методика позволяет моделировать аварийные режимы в системах тягового электроснабжения, оснащенных установками продольной емкостной компенсации. Результаты моделирования показали применимость методики для решения практических задач, возникающих при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения железных дорог.

Литература

1. Герман Л.А., Бородулин Б.М. Параметры продольной емкостной компенсации тяговой подстанции переменного тока // Вестн. ВНИИЖТ. 2010. № 1. С. 22-25.
2. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1983. 183 с.
3. Герман Л.А. Продольная емкостная компенсация в системе тягового электроснабжения переменного тока // Железные дороги мира. 2007. № 11. С. 53-58.
4. Герман Л.А., Гончаренко В.П. Современная схема продольной емкостной компенсации в системе тягового электроснабжения // Вестн. РГУПС. 2013. № 2. С. 12-17.
5. Серебряков А.С., Герман Л.А., Гончаренко В.П. Автоматизация установки продольной емкостной компенсации в тяговых сетях железных дорог // Электроника и электрооборудование транспорта. 2012. № 4. С. 2-8.
6. Герман Л.А., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. М.: МГУПС, 2014. 173 с.
7. Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог. М.: «Учеб.-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. 315 с.
8. Молин Н.И., Соколовский И.А., Щербakov В.С. Установка продольной емкостной компенсации в системе тягового электроснабжения переменного тока // ЭЛТРАНС-2009: материалы IV Междунар. симпозиума. СПб., 2010. С. 155-165.
9. Доманский И.В. Режимы работы системы тягового электроснабжения переменного тока с устройствами компенсации реактивной мощности // Электротехника и электромеханика. 2015. № 3. С. 59-66.
10. Ермоленко Д.В., Молин Н.И., Павлов И.В. Исследование эффективности многофункциональных компенсирующих устройств в эксплуатационных условиях // Вестн. ВНИИЖТ. 1991. № 7. С. 44-47.
11. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008. 334 p.
12. Biesenack H., Braun E., George G. Energieversorgung elektrischer bannen. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag. 2006. 732 p.
13. Алексеев Е.А., Булатов Ю.Н., Закарюкин В.П. Моделирование аварийных режимов в системах электроснабжения железных дорог. Иркутск: ИрГУПС, 2016. 170 с.
14. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та. 2005. 273 с.
15. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск: ИрГУПС, 2011. 170 с.

16. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование многообмоточных трансформаторов в фазных координатах // Электротехника. 2008. № 5. С. 56-61.

17. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Ле Конг Зань. Математические модели узлов нагрузки электротехнических систем, построенные на основе фазных координат. Иркутск: ИрГУПС, 2013. 176 с.

18. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Мультифункциональный подход к моделированию электро-энергетических систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 4 (40). С. 100-107.

References

1. German L.A., Borodulin B.M. Parameters of series capacity compensation of alternating current tractive substation // Vestnik VNIIZHT «Vestnik of the Railway Research Institute». 2010. № 1. P. 22-25.
2. Borodulin B.M., German L.A., Nikolaev G.A. Capacitor installations of electrified railroads. M.: Transport, 1983. 183 p.
3. German L.A. Longitudinal capacitive compensation in the traction power system of alternating current // Zheleznyye dorogi mira. 2007. № 11. P. 53-58.
4. German L.A., Goncharenko V.P. Modern longitudinal capacitive compensation scheme in the traction power supply // Vestn. RGUPS. 2013. № 2. P. 12-17.
5. Serebryakov A.S., German L.A., Goncharenko V.P. Automation of installation of longitudinal capacitive compensation in traction networks of railways // Electronics and electrical equipment of transport (EET). 2012. № 4. P. 2-8.
6. German L.A., German V.L. Electrical power supply automation of tractive alternating current nets. M.: MGUPS, 2014. 173 p.
7. German L.A., Serebryakov A.S. Controlled installations of a capacitive compensation in railroad systems of tractive electrical power supply. M.: «Ucheb.-metodicheskii tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte», 2013. 315 p.
8. Molin N.I., Sokolovskii I.A., Shcherbakov V.S. Installation of the series capacity in the system of the traction of electrical supply of the alternative current // ELTRANS-2009: materialy IV Mezhdunar. simpoziuma. SPb., 2010. P. 155-165.
9. Domanskii I.V. Operation modes of alternating current tractive power supply system with reactive power compensation installations // Электротехника і електромеханіка. 2015. № 3. P. 59-66.
10. Ermolenko D.V., Molin N.I., Pavlov I.V. A research of efficiency of the multipurpose compensating devices in operational conditions // Vestn. VNIIZHT «Vestnik of the Railway Research Institute». 1991. № 7. P. 44-47.
11. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008. 334 p.
12. Biesenack N., Braun E., George G. Energieversorgung elektrischer bannen. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag. 2006. 732 p.
13. Alekseenko E.A., Bulatov Yu.N., Zakaryukin V.P. Emergency mode simulation in railroad electrical power supply systems. Irkutsk: IrGUPS, 2016. 170 p.
14. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Asymmetrical modes of electric systems. Irkutsk: Izd-vo Irkut. un-ta. 2005. 273 p.
15. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Methods of joint simulation of alternating current tractive and external electric power supply systems. Irkutsk: IrGUPS, 2011. 170 p.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of multiwinding transformers in phase coordinates // Elektrotehnika. 2008. № 5. P. 56-61.
17. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Le Kong Zan'. Mathematical models of loading nodes of electric energy systems, constructed on the basis of phase coordinates. Irkutsk: IrGUPS, 2013. 176 p.
18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multi-functional approach to the simulation of electro-energy systems // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2013. № 4 (40). P. 100-107.