

К.Д. Рубцов¹, Л.И. Жуйко¹

¹ Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения (КрИЖТ ИрГУПС), г. Красноярск, Российская Федерация

МОБИЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ПОПЕРЕЧНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Аннотация. В данной научной статье рассматриваются мобильные устройства поперечной емкостной компенсации реактивной мощности. Авторы обсуждают принцип работы устройств, их влияние на качество электроэнергии (на примере участка Кемчуг-Кача) и уровень потерь.

Статья описывает конструкцию и основные технические характеристики мобильных устройств, а также анализирует их преимущества и недостатки по сравнению с традиционными компенсаторами. Отдельное внимание уделяется вопросам расчёта входного индуктивного сопротивления системы электроснабжения аналитическим методом.

Ключевые слова: поперечная емкостная компенсация, реактивная мощность, мобильные устройства, электроэнергетические системы, компенсаторы, качество электроэнергии, системы тягового электроснабжения.

K.D. Rubtsov¹, L.I. Zhuiko¹

¹ Krasnoyarsk Railway Transport Institute, branch of Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk, the Russian Federation

MOBILE DEVICES FOR TRANSVERSE CAPACITIVE REACTIVE POWER COMPENSATION

Abstract. This scientific article discusses mobile devices for transverse capacitive reactive power compensation. The authors discuss the principle of operation of the devices, their impact on the quality of electricity (using the example of the Kemchug-Kacha site) and the level of losses.

The article describes the design and main technical characteristics of mobile devices, as well as analyzes their advantages and disadvantages compared to traditional compensators. Special attention is paid to the calculation of the input inductive resistance of the power supply system by the analytical method.

Keywords: transverse capacitive compensation, reactive power, mobile devices, electric power systems, compensators, power quality, traction power supply systems.

В современном мире энергия является одним из ключевых факторов, определяющих развитие экономики и социальной сферы. Эффективное использование энергии способствует снижению зависимости от импорта энергетических ресурсов, а также позволяет уменьшить негативное воздействие на окружающую среду. Поэтому особое внимание уделяется повышению энергетической эффективности и надёжности электроэнергетических систем, улучшению их экологических характеристик.

Одним из способов решения этих задач является применение устройств компенсации реактивной мощности (РМ). Данные устройства позволяют оптимизировать режимы работы электроэнергетических систем и снизить потери электрической энергии. Однако, традиционные компенсаторы имеют ряд недостатков, которые делают их менее привлекательными по сравнению с новыми технологиями: ограниченная мощность, сложность настройки, низкая эффективность, большой размер и вес, высокая стоимость, сложность обслуживания, ограниченный срок службы

В данной статье предлагается использовать мобильные устройства поперечной емкостной компенсации (ПЕК) реактивной мощности (РМ). Данные устройства представляют собой системы, регулирующие и контролирующие качество поставляемой электрической энергии.

Принцип действия мобильных устройств поперечной компенсации реактивной мощности заключается в использовании конденсаторных батарей (обычно состоят из нескольких ступеней, каждая из которых имеет свой контроллер и подключается к сети через разъединитель) для регулирования коэффициента мощности ($\cos \varphi$) и снижения потерь электроэнергии. Наличие конденсаторных батарей в установке обеспечивает надежность и безопасность системы, а также позволяет оперативно регулировать компенсацию реактивной мощности в зависимости от потребностей. Устройства поперечной компенсации работают путем подключения или отключения конденсаторов из электрической цепи в зависимости от нагрузки и изменения $\cos \varphi$. Конденсаторы подключаются параллельно к нагрузке, что позволяет им компенсировать индуктивную составляющую тока и улучшить общий коэффициент мощности.

Процесс регулирования происходит автоматически с помощью микропроцессорного контроллера, который анализирует параметры сети и регулирует подключение и отключение конденсаторных блоков для поддержания оптимального коэффициента мощности.

Основное назначение поперечной компенсации – повышение коэффициента мощности [8].

Обычно конденсаторы размещаются таким образом, чтобы максимально сократить потери электроэнергии в электрических системах. Также важным фактором является увеличение уровня напряжения, которое достигается при установке конденсаторов. В некоторых ситуациях размещение конденсаторов определяется именно этим требованием.

Данные мобильные устройства обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными компенсаторами:

1. *Эффективность*: мобильные устройства ПЕК являются высокоэффективными и позволяют экономить энергию.

2. *Компактность*: имеют небольшие размеры и могут быть легко интегрированы уже в существующие системы.

3. *Надежность*: обеспечивают стабильную и надежную работу даже при высоких температурах и влажности. Они также обладают высокой устойчивостью к вибрации и ударам, что делает их идеальными для применения в жестких условиях.

4. *Экологичность*: работают без использования вредных веществ, таких как свинец или кадмий. Это делает их безопасными для окружающей среды и здоровья человека.

5. *Универсальность*: ПЕК РМ могут быть адаптированы для работы с различными типами источников питания (включая одно- и трехфазные сети). Это позволяет использовать их в различных приложениях, от промышленных систем до бытовой техники.

6. *Простота установки и обслуживания*: имеют длительный срок службы и могут работать без замены компонентов в течение многих лет.

7. *Улучшение качества сигнала*: мобильные устройства поперечной емкостной компенсации улучшают качество сигнала, устраняя шумы и помехи, что обеспечивает более стабильную и надежную передачу данных.

8. *Экономическая эффективность*: использование мобильных устройств поперечной емкостной компенсации может привести к снижению общей стоимости системы за счет экономии энергии, уменьшения размеров компонентов и увеличения срока службы.

Мобильные устройства ПЕК РМ обычно состоит из следующих основных компонентов:

1. Железнодорожная платформа: для перевозки;
2. Опорный полимерный, опорный фарфоровый, проходной изолятор: для обеспечения электрической изоляции и механического соединения токоведущих проводников;
3. Ячейка КРУН 10 кВ: для приёма и распределения электрической энергии;
4. Реактор: для ограничения тока в электрической цепи путём создания индуктивного сопротивления;
5. Токопровод: для передачи электрического тока от источника к потребителю;

6. Трансформатор напряжения (ТН): для измерения и контроля параметров электрической сети, а также для питания измерительных приборов и защитных устройств;
7. Конденсаторные батареи: для компенсации РМ, повышения коэффициента мощности и стабилизации напряжения;
8. Привод разъединителя: для включения и отключения разъединителей (создание видимого разрыва);
9. Линейный разъединитель: для коммутации электрических цепей без нагрузки;
10. Вакуумный выключатель: для включения и отключения электрических цепей при нормальных и аварийных режимах;
11. Трансформатор тока (ТТ): для измерения токов в электрической сети;
12. Шинный разъединитель с заземляющим ножом: для коммутации токоведущих шин в распределительных устройствах (РУ) и щитах. При этом заземляющие ножи предназначены для обеспечения безопасного заземления оборудования установки при проведении ремонтных работ;
13. Контейнер с модулем управления: для установки и эксплуатации различного электротехнического и электронного оборудования (например, системы автоматизации, релейная защита (РЗ), управления и телекоммуникации).

Важно отметить, что использование устройств поперечной компенсации требует профессионального подхода и должно быть выполнено в соответствии с действующими стандартами и правилами безопасности. Также необходимо учитывать, что компенсация реактивной мощности может привести к увеличению общего потребления электроэнергии, поэтому ее применение должно быть обосновано и оптимизировано с учетом всех факторов.

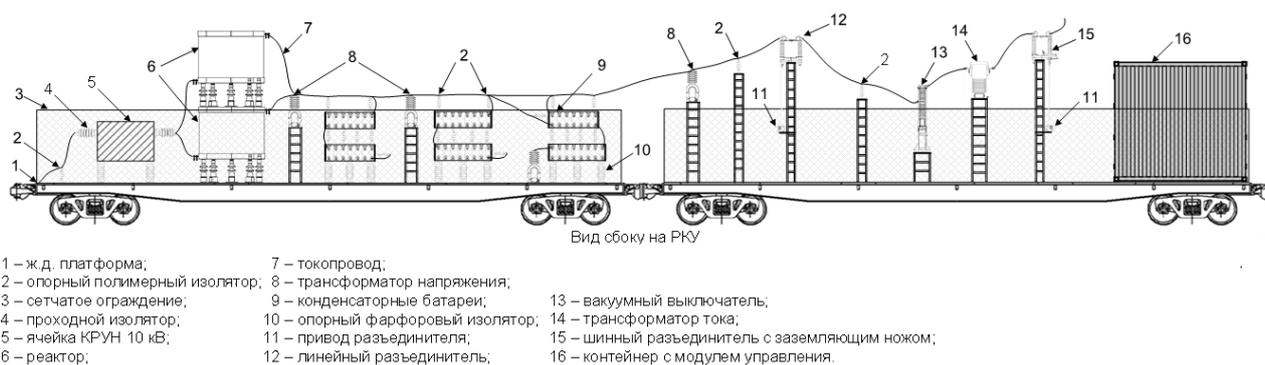


Рис. 1. Размещение оборудования передвижной установки компенсации реактивной мощности на железнодорожных путях

Для дальнейшего расчёта выбираем участок железной дороги Кемчуг-Кача (рисунок 2,3). Расчёт значений индуктивного сопротивления ТС от ПС до ТП Кемчуг и Кача будут идентичным. Предварительно потребуется выполнить расчёт удельного сопротивления ТС с учётом актуальных параметров контактной подвески, типы которых приведены в таблице 1.

На данном участке применяется система тягового электроснабжения 25 кВ, которая содержит 2 тяговые подстанции (ТП), 2 пункта параллельного соединения (ППС), 1 пост секционирования (ПС). Данный участок имеет двухстороннее питания от линии электропередач (ЛЭП) 110 кВ от РП Кемчуг и РП Кача.

На подстанциях представленного участка установлены следующие трансформаторы: ТДТНЖ-40000/110/27,5/35, а также устройства поперечной и продольной емкостной компенсации реактивной мощности.

Выполнение расчётов было выполнено в программном комплексе «КОРТЭС», предназначенных для решения различных расчётных задач, связанных с выбором параметров, определением характеристик режимов и нагрузочной способности систем тягового электроснабжения и их отдельных элементов [2].

Тяговые расчёты предназначены для решения различного рода задач, которые связаны с движением поездов, и возникающие при проектировании железных дорог, локомотивов в процессе их эксплуатации. Для определения параметров системы тягового электроснабжения (СТЭ) тяговые расчёты являются основным исходным материалом, на котором основываются все дальнейшие расчёты [2].

Тяговый расчёт выполняется при помощи программы «Trelk», входящий в состав комплекса «КОРТАЭС». Исходными данными для проведения расчётов являются следующие параметры выбранного участка: расположение отдельных пунктов, продольный профиль (создан с учётом всех исходных данных, ограничения скорости). Данные параметры задаются с помощью программы «Uchastk».

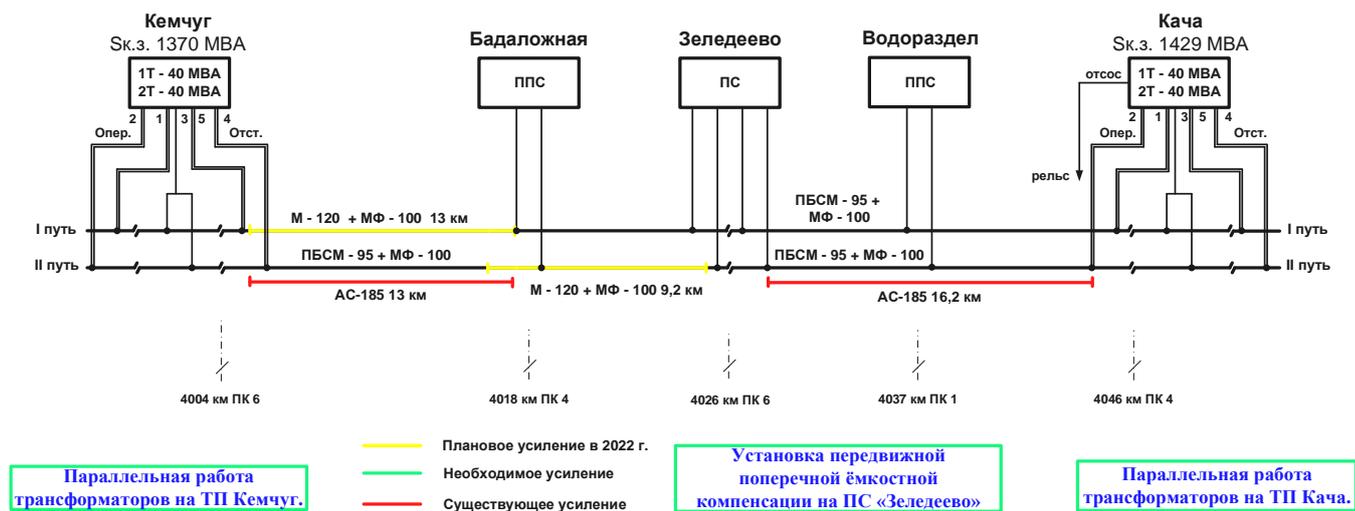


Рис.2. Схемы межподстанционной зоны Кемчуг-Кача



Рис.3. Профиль пути Кемчуг-Зелеевее

Протяжённость подъёма данного участка составляет 25 км. Крутизна составляет от 4 до 11‰.

Для участка Зелеевее-Кача удельное сопротивление соответствует значению для первого типа контактной подвески. Аналогичным образом выполняется расчет для режима работы тяговой сети с двумя тяговыми подстанциями Кемчуг и Кача, включенными параллельно на тяговую нагрузку. Результаты расчетов индуктивных сопротивлений для обоих режимов работы тяговой сети сводятся в таблицу 1.

Таблица 1 – Расчёт индуктивных сопротивлений

Наименование расчётного индуктивного сопротивления	Количество работающих трансформаторов	
	Один	Два
Понижающих трансформаторов $X_{тр}$, Ом	1,93	0,96
Системы внешнего электроснабжения X_c , Ом	Кемчуг	0,55
	Кача	0,53

Тяговой сети $X_{тс}$, Ом	Кемчуг	5,48	5,48
	Кача	4,71	4,71
Входные сопротивления от ТП до ПС, $X_{вх пс}$, Ом	Кемчуг	10,44	8,5
	Кача	9,63	7,69
Входные сопротивления системы внешнего и тягового электроснабжения, $X_{вх}$, Ом		5,01	4,04

Расчет минимального напряжения на токоъемнике электропоезда и соответствующей ему ординаты проводился в соответствии с СТО РЖД «Методика расчета показателей системы тягового электроснабжения железной дороги переменного тока для выбора типа и мощности устройств компенсации реактивной мощности».

Расчет необходимой мощности компенсирующих устройств на посту секционирования для данного участка производится исходя из условия обеспечения минимального напряжения на токоъемнике электропоезда не ниже минимального нормируемого значения. Минимально допустимое напряжение на токоъемнике электропоезда принимается равным 21 кВ (среднее значение за 3 минуты).

Расчет необходимой мощности компенсирующих устройств будет проводиться с учетом повышения напряжения на токоъемнике электропоезда на 1,2 кВ относительно минимального уровня напряжения исходной схемы. Поэтому принимаем $U_{факт} = 20,55$ кВ и $U_{мин доп} = 21,75$ кВ. Проводим расчет мощности компенсирующих устройств для режима работы тяговой сети с одним тяговым подстанциям Кемчуг и Кача с использованием значения входного индуктивного сопротивления систем внешней и тяговой электроснабжения, полученного аналитическим путем.

Расчёт мощности КУ при помощи основного и проверочного метода для режима работы с одним и с двумя трансформаторами сведём в таблицу 2.

Таблица 2 – Расчёт мощности КУ

Расчётный параметр		Количество работающих трансформаторов	
		Один	Два
Расчёт мощности КУ, $Q_{ку}$, МВАр	Аналитический метод	8,3	10,3
	Метод КЗ	8,2	10,4

Как видно из расчетов входного индуктивного сопротивления систем внешней и тягового электроснабжения и мощности компенсирующих устройств, погрешность значений составляет 1-2%, следовательно, можно заключить, что оба метода верны и полученные с их помощью расчеты достоверны. Для дальнейших вычислений были использованы значения мощности компенсирующих устройств, полученные аналитическим методом.

Таким образом, в данной научной работе было рассмотрено использование мобильных устройств поперечной емкостной компенсации реактивной мощности. Также рассчитано входное индуктивное сопротивление участка железной дороги Кемчуг-Кача.

Следовательно, применение мобильных устройств поперечной емкостной компенсации реактивной мощности положительно влияют на качество электрической энергии и снижения потерь в электрических сетях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Герман, Л. А. Регулируемые установки ёмкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог : учебное пособие / Л. А. Герман, А. С. Серебряков. – Москва : УМЦ ЖДТ, 2015 – 316 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-89035-799-1. – Текст : непосредственный.
- СТО РЖД 07.022.2 – 2015. Методика выбора мест размещения и мощности средств

продольной и поперечной компенсации реактивной мощности. – Москва. : ОмГУПС – 51 с. – Текст : непосредственный.

3. СТО РЖД 07.022.1 – 2015. Методика расчёта показателей для выбора типа и мощности средств компенсации реактивной мощности. – Москва. : ОмГУПС – 79 с. – Текст : непосредственный.

4. Снижение потерь электроэнергии при помощи установок компенсации реактивной мощности на посту секционирования тяговой сети переменного тока / Л. А. Герман, А. С. Серебряков – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 2019. – Т. 78. №5. – с. 297-302.

5. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии / Ю. С. Железко. – Москва : НЦ ЭНАС, 2016. – 456 с. – Текст : непосредственный.

6. Бородулин, Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог : Б. М. Бородулин, Л. А. Герман, Г. А. Николаев. – Москва. : Транспорт, 1983. – 183 с. – Текст : непосредственный.

7. Рубцов, К. Д. Применение продольной и поперечной компенсации на станции Минино / К. Д. Рубцов, П. О. Чинков // Молодежная наука : труды XXVI Всероссийской студенческой научно-практической конференции КрИЖТ ИрГУПС, Красноярск, 22 апреля 2022 года. Том 1. – Красноярск: Красноярский институт железнодорожного транспорта - филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения, 2022. – С. 138-141. – EDN FFZQBR.

8. Кабышев А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учебное пособие / А.В. Кабышев; Томских политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 234 с.

9. Тер-Оганов, Э.В. Электроснабжение железных дорог : учеб. для студентов университета (УрГУПС) / Э.В. Тер-Оганов, А.А. Пышкин. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. – 432 с.

REFERENCES

1. Herman, L. A. Adjustable capacitive compensation installations in traction power supply systems of railways : a textbook / L. A. Herman, A. S. Serebryakov. – Moscow : UMTS ZhDT, 2015 – 316 p. – (Higher education). – ISBN 978-5-89035-799-1. – Text : direct.

2. STO RZD 07.022.2 – 2015. The method of selecting the locations and power of the means of longitudinal and transverse reactive power compensation. – Moscow. : OmGUPS – 51 p. – Text : direct.

3. STO RZD 07.022.1 – 2015. The method of calculating indicators for selecting the type and power of reactive power compensation means. – Moscow. : OmGUPS – 79 p. – Text : direct.

4. Reduction of electricity losses using reactive power compensation units at the AC traction network partitioning station / L. A. German, A. S. Serebryakov – Text : direct // Bulletin of VNIIZHT. – 2019. – Vol. 78. No.5. – pp. 297-302.

5. Zhelezko, Y. S. Loss of electricity. Reactive power. The quality of electricity / Yu. S. Zhelezko. – Moscow : NC ENAS, 2016. – 456 p. – Text : direct.

6. Borodulin, B. M. Condenser installations of electrified railways: B. M. Borodulin, L. A. German, G. A. Nikolaev. – Moscow. : Transport, 1983. – 183 p. – Text : direct.

7. Rubtsov, K. D. The application of longitudinal and transverse compensation at the Minino station / K. D. Rubtsov, P. O. Chinkov // Youth science : proceedings of the XXVI All-Russian Student Scientific and Practical Conference KRIZHT IrGUPS, Krasnoyarsk, April 22, 2022. Volume 1. – Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Institute of Railway Transport - branch of the Irkutsk State University of Railway Engineering, 2022. – pp. 138-141. – EDN FFZQBR.

8. Kabyshev A.V. Reactive power compensation in electrical installations of industrial enterprises: textbook / A.V. Kabyshev; Tomsk Polytechnic University. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2012. – 234 p.

9. Ter-Oganov , E.V. Electric power supply of railways : studies. for University students (UrGUPS) / E.V. Ter-Oganov, A.A. Pyshkin. – Yekaterinburg : Publishing house of UrGUPS, 2014. – 432 p.

Информация об авторах

Жуйко Леонид Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы обеспечения движения поездов», Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения (КрИЖТ ИрГУПС), г. Красноярск, e-mail: zhujko49@mail.ru

Рубцов Кирилл Дмитриевич – студент 5 курса кафедры «Системы обеспечения движения поездов», Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения (КрИЖТ ИрГУПС), г. Красноярск, e-mail: kirill.rubtsov.2001@mail.ru

Information about the authors

Leonid Ivanovich Zhujko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Train Traffic Management Systems", Krasnoyarsk Institute of Railway Transport – branch of Irkutsk State University of Railway Engineering (KRIZHT IrGUPS), Krasnoyarsk, e-mail: zhujko49@mail.ru

Rubtsov Kirill Dmitrievich – 5th year student of the Department of "Train Traffic Support Systems", Krasnoyarsk Institute of Railway Transport – branch of Irkutsk State University of Railways (KRIZHT IrGUPS), Krasnoyarsk, e-mail: kirill.rubtsov.2001@mail.ru