



УДК 621.331:621.311.025

**А. М. Евстафьев, А. Н. Сычугов**

Петербургский государственный университет путей сообщения

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОВЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Рассмотрены основные методы и схемотехника устройств, осуществляющих регулирование реактивной мощности и ограничение высших гармоник тока и напряжения на электрическом подвижном составе переменного тока, а также принципы действия и структуры активных и гибридных фильтров и корректоров мощности. Приведены примеры различных технических решений, обеспечивающих активную фильтрацию высших гармоник.

энергоэффективность, качество электрической энергии, электрический подвижной состав переменного тока, зонно-фазовое регулирование, коэффициент мощности, четырехквadrантный (4qS) преобразователь.

### **Введение**

Актуальность снижения расхода электроэнергии на тягу поездов обусловлена ее существенной долей в эксплуатационных расходах железных дорог России. Являясь одним из самых значительных потребителей электроэнергии в России, ОАО «Российские железные дороги» уделяют большое внимание повышению энергоэффективности перевозочного процесса. В первом полугодии 2012 года внедрение ресурсосберегающих мероприятий позволило снизить потребление электроэнергии на тягу поездов на 16 млн кВт·ч, или 35 миллионов рублей.

Стратегическим приоритетом энергетической стратегии ОАО РЖД являются разработка и внедрение в локомотивное хозяйство новых типов подвижного состава, оснащение существующего парка локомотивов системами автоведения. После продолжительного периода застоя в транспортном машиностроении производители железнодорожной

техники начинают применять передовые ресурсосберегающие технологии мирового уровня. Этому способствует последовательное ужесточение требований ОАО РЖД к эксплуатационным характеристикам новой техники [1].

Однако в настоящее время на железных дорогах России продолжается эксплуатация электровозов переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП): ВЛ80 Р, ВЛ85, ВЛ65, ЭП1 и 2ЭС5 К, а также электровозов с диодными выпрямителями, оборудованных ступенчатым регулятором напряжения тягового трансформатора: ВЛ80 Т, ВЛ80 С.

Несмотря на то, что пуск и регулирование скорости электровозов переменного тока осуществляются без потерь в пусковых сопротивлениях регулированием напряжения, повышенное потребление реактивной мощности, искажения формы тока, потребляемого из контактной сети, являются общим недостатком электровозов переменного тока это-

го поколения. Значения коэффициента мощности этих электровозов в эксплуатации не превышают 0,8 [1], [2]. Коэффициент мощности характеризует увеличение нагрузки контактной сети и устройств энергоснабжения, вызываемое сдвигом тока по фазе относительно напряжения и наличием высших гармоник тока.

### 1 Энергетические показатели электровозов переменного тока с зонно-фазовым регулированием напряжения

На электровозах ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ65, ЭП1 и 2ЭС5К используется схема зонно-фазового регулирования с выпрямительно-инверторным преобразователем (рис. 1). При рекуперации схема обеспечивает инвертирование тока, вырабатываемого тяговыми двигателями за счет выпрямительно-инверторного преобразователя, что обеспечивает увеличение коэффициента мощности.

Представленная на рисунке 1 схема имеет очевидные достоинства: плавное регулирование напряжения при небольшом количестве выводов обмотки трансформатора и плеч ВИП. Схема обеспечивает четырехзонное регулирование напряжения при трех секциях обмотки тягового трансформатора. Изменением угла открытия тиристоров  $\alpha$  осуществляется плавное, бесступенчатое регулирование напряжения на тяговых двигателях, однако оно вызывает понижение коэффициента мощности электровоза. При сдвиге момента отпирания тиристоров на

угол  $\alpha$  на тот же угол смещается переменный ток по отношению к напряжению сети. Коэффициент мощности в этом случае

$$K_p = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \cos \alpha.$$

Следовательно, коэффициент мощности электровоза с использованием схемы выпрямительно-инверторного преобразователя уменьшается пропорционально уменьшению выпрямленного напряжения, поэтому в эксплуатации энергетические показатели выпрямительно-инверторных преобразователей существенно ниже, так как они значительную часть времени работают при напряжении в контактной сети ниже номинального. Так как ВИП рассчитан на работу во всем диапазоне допустимых напряжений контактной сети, при номинальном и повышенном напряжении в контактной сети преобразователь работает с заниженным выходным напряжением, используя три с половиной зоны регулирования. Снижение коэффициента мощности у электровозов с выпрямительно-инверторным преобразователем по сравнению с электровозами со ступенчатым регулированием напряжения и диодными выпрямителями иллюстрирует рисунок 2, на котором представлены зависимости коэффициента мощности электровозов ВЛ80 Т и ВЛ80 Р с диодным выпрямителем (кривая 1) и выпрямительно-инверторным преобразователем (кривая 2) соответственно.

Недостатком фазового регулирования напряжения является также повышенная пульсация выпрямленного тока, возникающая в результате того, что кривая выпрямленного

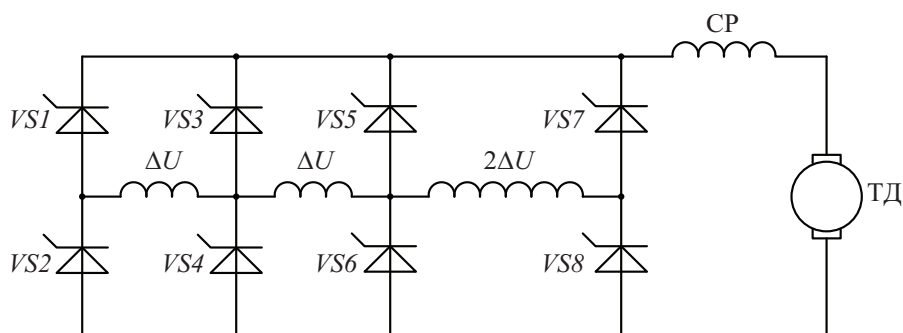


Рис. 1. Принципиальная схема зонно-фазового регулирования напряжения

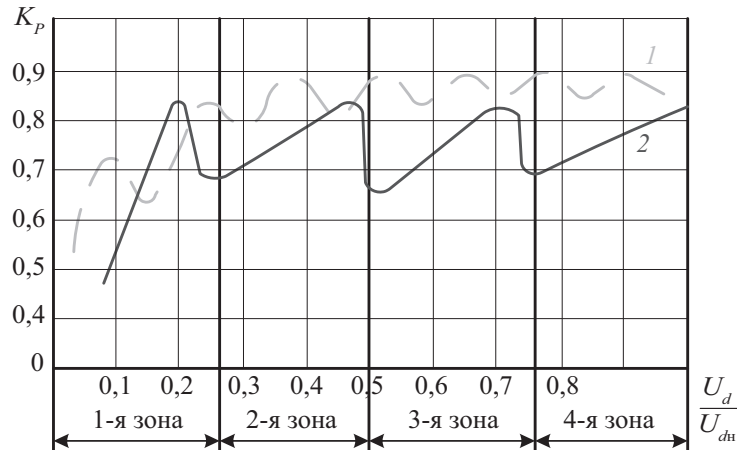


Рис. 2. Зависимость коэффициента мощности электровозов с зонно-фазовым регулированием

напряжения переходит в область отрицательных значений, в которой выпрямленный ток протекает против ЭДС трансформатора [3]. Действующее значение пульсирующего тока больше, чем его постоянная составляющая, что вызывает дополнительные потери. Коэффициент формы пульсирующего тока, равный отношению действующего значения к среднему для синусоидальной формы полупериода выпрямленного напряжения (а приближенно – и для искаженной формы), определяется по формуле:

$$K_{\text{форм}} = \sqrt{1 + 0,13K_{\text{по}}^2},$$

где  $K_{\text{по}}$  – коэффициент пульсаций,

$$K_{\text{по}} = \frac{\Delta i_d}{I_d},$$

где  $I_d$  – постоянная составляющая тока.

При значении пульсации тока до  $\pm 30\%$  увеличение потерь в активных сопротивлениях достигает 5%. Пульсация выпрямленного тока вызывает увеличение действующего значения переменного тока в обмотках тягового трансформатора и также понижает коэффициент мощности электровоза.

На рисунке 3 приведена форма переменного тока  $i_T$  при пульсирующем выпрямленном токе, на рисунке 4 – составляющая тока, вызванная пульсацией выпрямленного тока. Первая гармоника этого тока  $i_1$  отстает от на-

пряжения на  $\pi/2$ . Суммируясь с основной составляющей – первой гармоникой тока прямоугольной формы, она вызывает отставание тока по фазе. Следовательно, пульсация выпрямленного тока вызывает понижение  $\cos\varphi$  выпрямителя и коэффициента мощности  $K_p$ . При неискаженной форме выпрямленного напряжения  $\text{tg}\varphi = 0,353 \times K_{\text{по}}$ . Зависимости  $\cos\varphi (K_{\text{по}})$  и  $K_p (K_{\text{по}})$  представлены на рисунке 5.

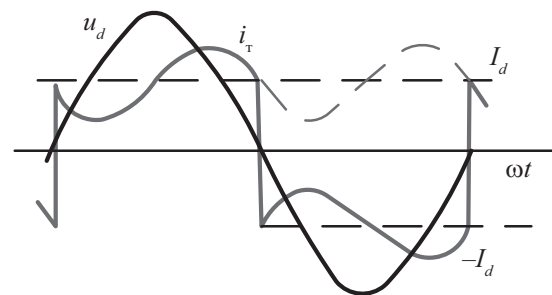


Рис. 3. Форма переменного тока при пульсирующем выпрямленном токе

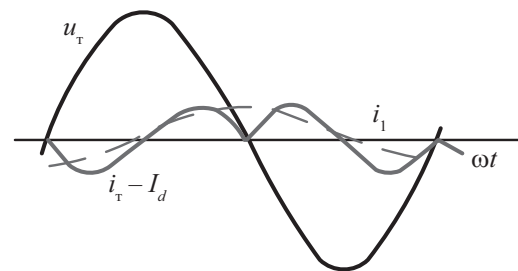


Рис. 4. Форма составляющей тока, вызванного пульсацией выпрямленного тока

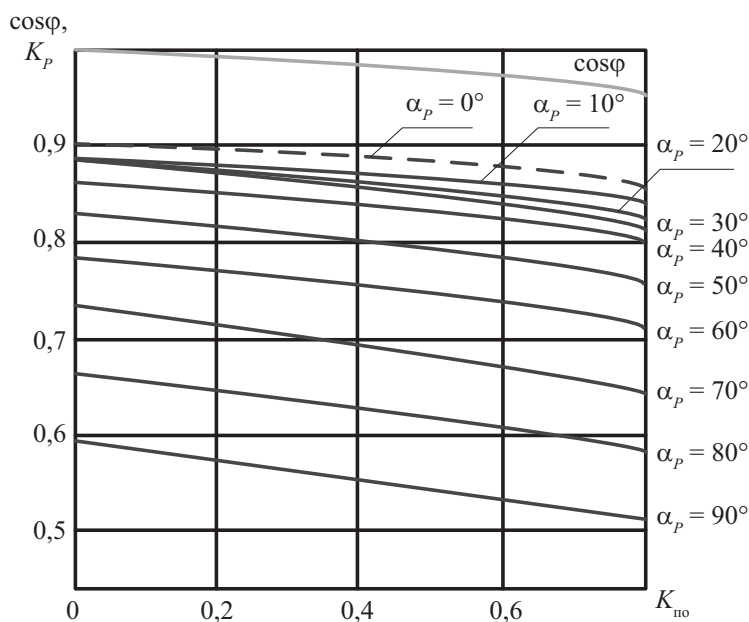


Рис. 5. Энергетические характеристики электровозов с зонно-фазовым регулированием

Хотя электровозы с ВИП имеют возможность возврата энергии в сеть при использовании рекуперативного торможения, это не компенсирует повышенных потерь энергии. Перечень негативных факторов, возникающих из-за искажения форм тока и напряжения в электровозах переменного тока, на этом не ограничивается.

Гармоники тока, создаваемые нелинейной нагрузкой ВИП, могут представлять собой серьезные проблемы для систем электропитания. Гармонические составляющие потребляемого из контактной сети тока, представляющие собой токи с частотами, кратными основной частоте, приводят к искажению формы тока в питающей сети и вызывают появление мощности искажения. Таким образом, электровозы переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями как объекты системы тягового электроснабжения представляют собой генераторы высших гармоник для других объектов системы. При этом происходит увеличение действующего значения тока, потребляемого из контактной сети, приводящее к повышенной загрузке оборудования [4].

Такое влияние уменьшения коэффициента мощности электровозов с ВИП на энергетические

показатели системы тяги переменного тока долгое время отрицалось специалистами, определяющими направления развития тягового привода. Поэтому устройства, повышающие коэффициент мощности, не применялись на отечественном ЭПС несмотря на их использование в зарубежной практике. В настоящее время в связи с ужесточением требований к качеству потребляемой электроэнергии и быстрым ростом тарифов этой проблеме стали уделять должное внимание [5].

Улучшение энергетических показателей системы тягового электроснабжения достигается установкой на тяговых подстанциях устройств компенсации реактивной мощности КРМ. Это позволяет снизить потребление реактивной мощности из системы внешнего энергоснабжения, но не влияет на потери в контактной сети тягового энергоснабжения. Для устранения этого недостатка используют КРМ, выполненные на реактивных элементах, конденсаторах и индуктивностях, устанавливаемые непосредственно на электровозе [6]. При выборе конденсаторной батареи КРМ требуемая суммарная емкость определяется исходя из формулы:

$$Q_c = P \cdot (\operatorname{tg}(\varphi_1) - \operatorname{tg}(\varphi_2)),$$

где значение  $(\operatorname{tg}(\varphi_1) - \operatorname{tg}(\varphi_2))$  определяется на основе значений  $\cos\varphi_1$  и  $\cos\varphi_2$  – коэффициентов мощности потребителя до установки компенсирующих устройств (действующий коэффициент мощности) и после установки компенсирующих устройств (желаемый или задаваемый предприятием электроснабжения) соответственно (рис. 6).

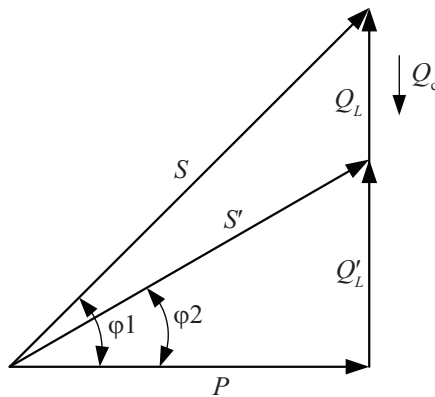


Рис. 6. Векторная диаграмма

## 2 Способы повышения энергетической эффективности электровозов переменного тока

На рисунке 6  $S$  и  $S'$  – полная мощность до и после компенсации,  $Q_L$  и  $Q'_L$  – индуктивная составляющая реактивной мощности до и после компенсации. На рисунке 7 показана схема подключения КРМ на электровозах ВЛ85–023 и ВЛ85–155 в цепь вторичной обмотки силового трансформатора.

Кривые 1 и 2 (рис. 8) иллюстрируют зависимости коэффициента мощности серийного

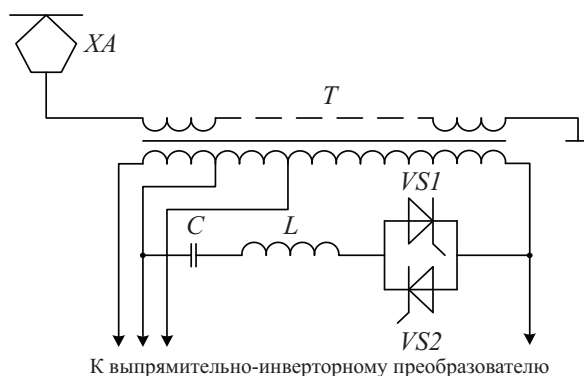


Рис. 7. Схема подключения КРМ

электровоза в режимах четырех- и двухзонного регулирования без компенсации реактивной мощности, а кривые 3 и 4 – соответствующие зависимости при подключенном КРМ. Наиболее близкими к оптимальным являются конденсаторы, имеющие реактивную мощность 520 квар (1475 мкФ) с резонансной частотой 135 Гц. Использование ВИП для регулирования напряжения на тяговых двигателях привело к увеличению гармонических искажений в контактной сети, что может привести к возникновению резонанса между конденсаторной установкой КРМ и индуктивностью контактной сети, приведенной к вторичной обмотке трансформатора.

Одним из основных параметров LC-контура КРМ является добротность. При увеличении добротности крутизна зависимости полного сопротивления LC-контура от частоты возрастает, а полоса пропускания сужается. Так как контактная сеть имеет низкие значения индуктивности, то при определенных условиях возможно возникновение явления антирезонанса на частотах, близких к частоте резонанса LC-контура КРМ, при этом возрастает сопротивление КРМ и увеличивается напряжение соответствующей гармоники напряжения в контактной сети, что может быть причиной аварийной ситуации из-за выхода из строя конденсатора КРМ, пробоя изоляции.

Таким образом, наличие в схеме КРМ LC-контура может быть причиной не только увеличения длительности переходных процессов, но и появления значительных перенапряжений и перегрузок по току. Чтобы исключить возникновение опасных перенапряжений и перегрузок по току в системе тягового электроснабжения, в простейшем случае в LC-контур КРМ вводят дополнительные резистивные элементы, снижающие его добротность, а также применяют рассогласованные конденсаторные системы, в которых последовательно с конденсаторными батареями включаются антирезонансные дроссели.

Последовательным включением дросселя и силового конденсатора создается контур с частотой резонанса ниже частоты высшей

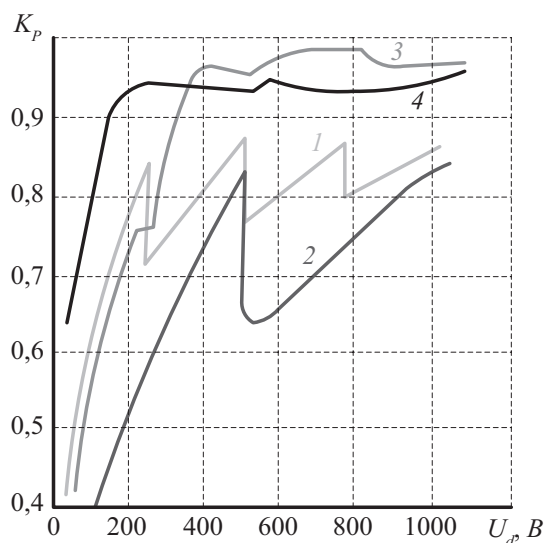


Рис. 8. Зависимости коэффициента мощности от способа компенсации

гармоники, присутствующей в контактной сети. Для всех гармоник, лежащих выше этой частоты, схема является индуктивной, и возможность резонанса между конденсаторной установкой КРМ и индуктивностью сети исключается [7], [8].

Использование на электровозах нерегулируемых компенсаторов реактивной мощности позволяет увеличить коэффициент мощности в рабочем диапазоне регулирования, но становится причиной перекомпенсации при малых токах нагрузки. Поэтому применение нерегулируемого КРМ в системе электроснабжения электровоза является эффективным в определенном диапазоне нагрузок.

Основные достоинства ёмкостного корректора коэффициента мощности – простая схемотехника и низкая стоимость. Однако существует ряд недостатков, ограничивающих их применение. Во-первых, схема КРМ является резонансной, из-за этого ухудшаются переходные процессы, протекающие в силовых цепях ЭПС при изменении параметров питающей сети. Возникающие при этом колебания напряжения и тока могут достигать критических значений. Во-вторых, невозможность корректировать параметры КРМ в эксплуатации не позволяет им оптимально и в полной мере выполнять свои

функции. Фазовое регулирование в сочетании с принудительной коммутацией [9], так называемое секторное регулирование, позволяет поддерживать значения  $\cos\varphi$  близким к единице [10], [11]. Применению этого способа препятствуют большие значения  $di/dt$  в силовых цепях ВИП, создающие помехи в линиях связи и СЦБ.

### 3 Принципы работы активных фильтров

Освоение промышленностью силовых электронных приборов позволило расширить возможности устройств компенсации реактивной мощности. Новая элементная база силовой электроники позволяет создавать преобразователи переменного – постоянного тока (*AC-DC*-преобразователи), работающие в четырех квадрантах комплексной плоскости на стороне переменного тока. Это позволяет управлять потоками электроэнергии в любом направлении по определенному закону [12]. Подключение накопителя энергии (конденсатора) к четырехквадрантному преобразователю  $4qS$  позволяет осуществлять обмен реактивной мощностью между сетью переменного тока и накопителем, включая мощность высших гармоник.

Многофункциональные регуляторы качества потребляемой электроэнергии, выполненные на основе четырехквadrантного преобразователя, в настоящее время широко применяются в качестве активного фильтра (АФ). Упрощенные схемы АФ представлены на рисунках 9 и 10. Принцип действия такого КРМ состоит в том, что АФ генерирует ток, равный сумме токов высших гармоник и реактивного тока нагрузки, но противоположный ему по фазе. В результате ток, потребляемый из контактной сети, содержит только активную составляющую тока нагрузки. Последняя функция соответствует традиционным компенсаторам реактивной мощности КРМ. Существенным недостатком активных фильтров являются их большая установленная мощность и как следствие – высокая стоимость.

Компромиссным решением является использование гибридных фильтров, сочетающих простоту и низкую стоимость пассивных фильтров, построенных на  $LC$ -цепях, с высокой эффективностью активных фильтров, при этом мощность используемого

четырёхквadrантного преобразователя может быть снижена до 10% от потребляемой реактивной мощности [13]. На рисунке 11 представлены варианты схем гибридных фильтров с параллельным и последовательным подключением четырехквadrантного преобразователя в цепь нагрузки.

В работах [14], [15] рассмотрены схемы и принцип работы гибридного фильтра для электровоза переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями, в котором пассивная схема  $LC$ -фильтра дополнена активным фильтром, выполненным по схеме четырехквadrантного преобразователя (рис. 12). Таким образом,  $LC$ -фильтр улучшает  $\cos\varphi$  и частично компенсирует одну из высших гармоник входного тока. Полная компенсация высших гармоник осуществляется активным фильтром.

## Заключение

Сочетая достоинства пассивных и активных фильтров, гибридные фильтры способ-

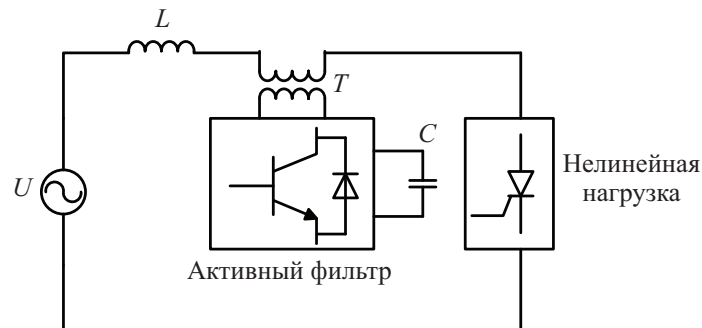


Рис. 9. Схема подключения АФ

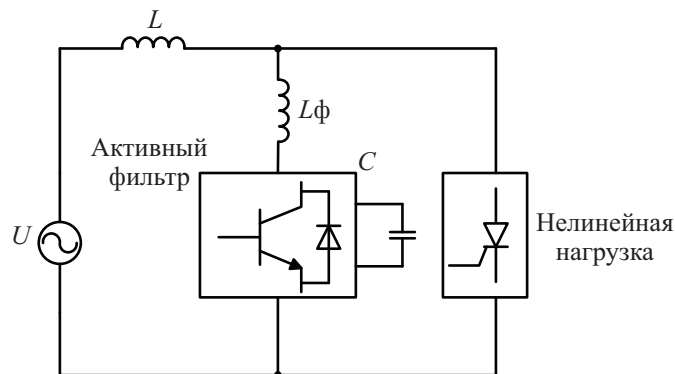


Рис. 10. Схема подключения АФ

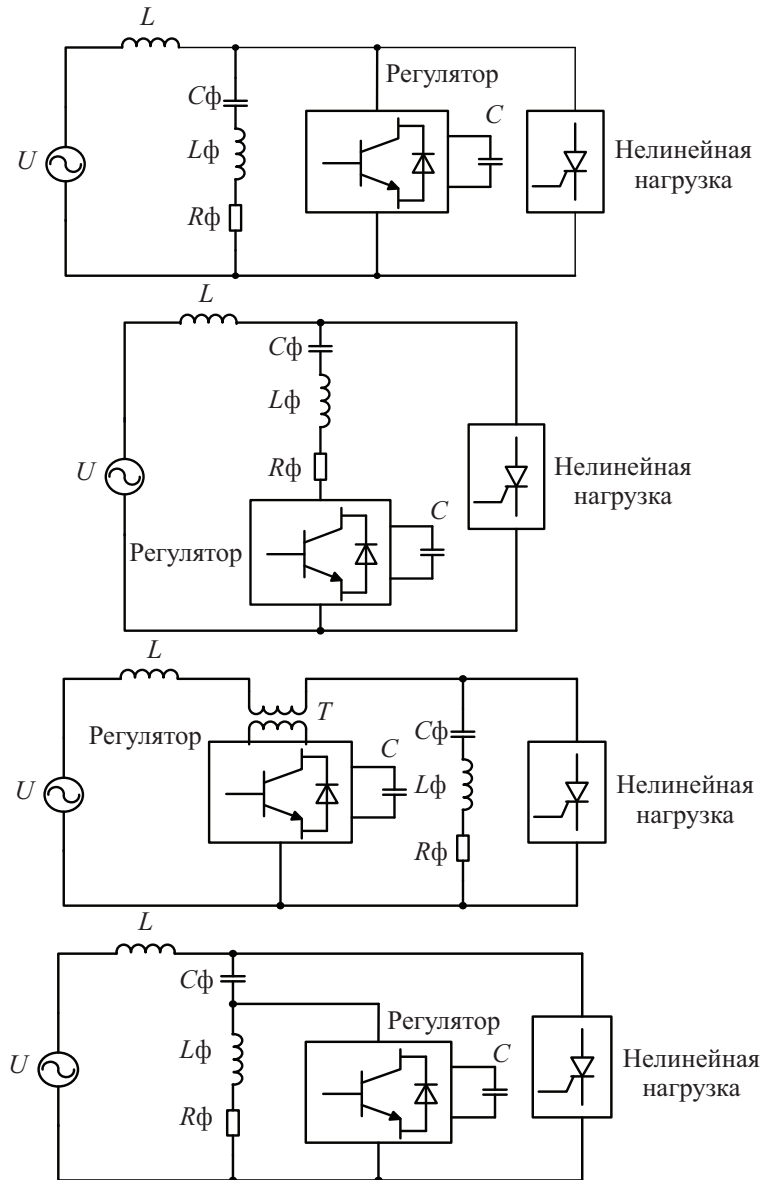


Рис. 11. Способы подключения гибридного фильтра

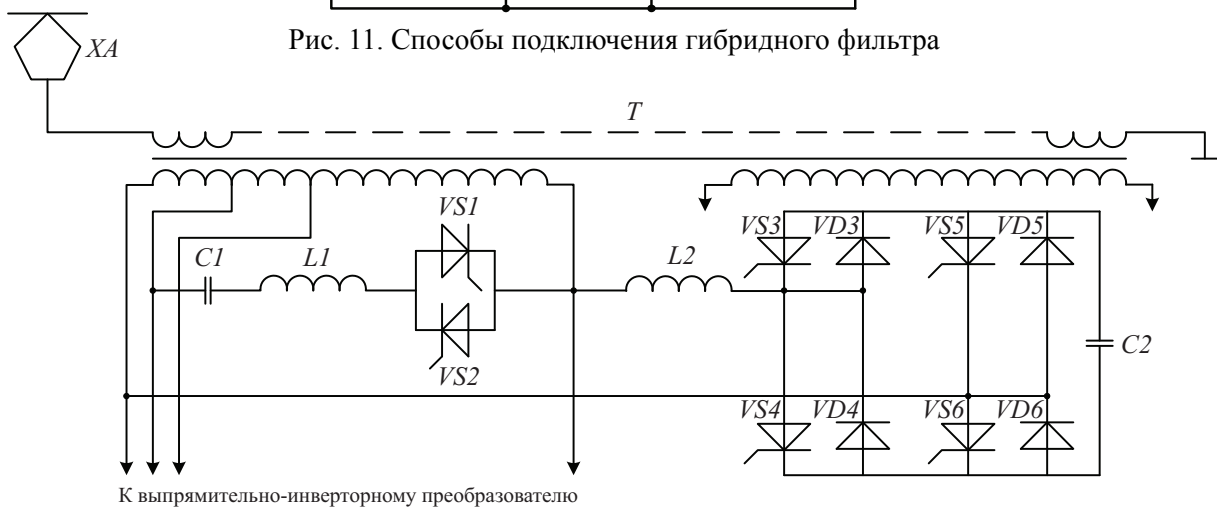


Рис. 12. Принципиальная схема подключения гибридного фильтра на электровазе с зонно-фазовым регулированием



ны значительно снизить стоимость КРМ. Проведенные исследования показали, что применение гибридного фильтра в качестве компенсатора реактивной мощности позволило улучшить значения коэффициента мощности и коэффициента искажения синусоидальности напряжения на токоприемнике электровоза.

### Библиографический список

1. **Приоритеты** ОАО РЖД: энергосбережение и энергоэффективность / В. А. Гапанович // Локомотив. – 2009. – № 12. – С. 8–11.
2. **Регулируемый** компенсатор реактивной мощности / А. М. Кривной, В. В. Литовченко // Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 9. – С. 30–31.
3. **Подвижной** состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты : учебник для вузов ж.-д. трансп. / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман. – М. : Транспорт, 1980. – 471 с.
4. **Качество** энергии в электрических сетях / А. Куско, М. Томпсон. – М. : Додэка-XXI, 2008. – 336 с.
5. **Основы** электрического транспорта : учебник для вузов / М. А. Слепцов, Г. П. Долаберидзе, А. В. Прокопович и др. – М. : Изд. центр «Академия», 2006. – 464 с.
6. **Конденсаторные** установки ООО «Элпри» – наиболее эффективное средство компенсации реактивной мощности / А. Лавров, В. Колпаков // Силовая электроника. – 2007. – № 3. – С. 116–119.
7. **Улучшение** энергетики электровозов переменного тока / Н. Н. Широченко, В. А. Татарников, З. Г. Бибинейшвили // Железнодорожный транспорт. – 1988. – № 7. – С. 33–37.
8. **Кондиционеры** сети на основе активных фильтров / В. В. Сазонов // Электротехника. – 2007. – № 5. – С. 28–34.
9. **Силовая** электроника : учебник для вузов / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. – М. : МЭИ, 2007. – 632 с.
10. **Пат. 2368051 Российская Федерация**, МПК H02J, H02P, B60L. Устройство для компенсации реактивной мощности / Мазнев А. С., Евстафьев А. М. ; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения». – № 2008110451/09 ; опубл. 20.09.2009, Бюл. № 26.
11. **Пат. № 2384929 Российская Федерация**, МПК H02J, H02P, B60L. Устройство для компенсации реактивной мощности / Мазнев А. С., Евстафьев А. М. ; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения». – № 2008110452/09 ; опубл. 20.03.2010, Бюл. № 8.
12. **Применение** гибридных фильтров для улучшения качества электроэнергии / Ю. К. Розанов, Г. М. Мустафа, А. Ю. Кутейникова, И. В. Иванов // Электричество. – 1995. – № 10. – С. 33–39.
13. **Применение** гибридных фильтров для подавления искажения электрической энергии на электроподвижном составе / Ю. М. Иньков, А. М. Комарицкий, М. В. Телегин // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2007. – № 6. – С. 15–17.
14. **Повышение** энергетических показателей электровозов переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями / Ю. М. Кулинич, А. Н. Савоськин // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2005. – № 1. – С. 163–169.
15. **Формирование** тока заданного гармонического состава активного компенсатора реактивной мощности / В. В. Зак, П. Г. Колпахчян // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электроводостроения. – 2012. – № 1. – С. 99–110.