

# Повышение пропускной способности железной дороги с установкой компенсации реактивной мощности

Л. А. GERMAN

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения» в Нижнем Новгороде (Филиал ФГБОУ ВО «СамГУПС» в Нижнем Новгороде), Нижний Новгород, 603011, Россия

**Аннотация.** Рассмотрены существующие регулируемые установки поперечной емкостной компенсации для повышения пропускной способности участков тяговой сети 25 и 2×25 кВ железных дорог России. Приведены характеристики статического генератора реактивной мощности на биполярных IGBT-транзисторах (изготовитель ООО НПП «РУ-Инжиниринг», Набережные Челны), переключаемой фильтрокомпенсирующей установки (изготовитель Горьковская железная дорога и Нижегородский филиал СамГУПС), трехступенчатой переключаемой фильтрокомпенсирующей установки. Для повышения пропускной способности все установки включаются на постах секционирования тяговой сети. Многолетняя работа статического генератора реактивной мощности и переключаемой фильтрокомпенсирующей установки показала их эксплуатационную эффективность. При этом предложены следующие модернизации: в статическом генераторе реактивной мощности рекомендуется уменьшить установленную мощность, заменяя ее на нерегулируемую компенсацию, а в переключаемой фильтрокомпенсирующей установке переключение ступеней осуществлять ступенями по 400–500 В для нормализации режима тяги электроподвижного состава.

Показано, что по техническим характеристикам переключаемая фильтрокомпенсирующая установка с тиристорным ключом не уступает статическому генератору реактивной мощности в части повышения пропускной способности, а по некоторым показателям превосходит его. В целом по сроку окупаемости переключаемая фильтрокомпенсирующая установка превосходит статический генератор реактивной мощности в связи с большой себестоимостью последнего. Предлагаются следующие варианты использования рассматриваемых установок. При необходимости мощности установок поперечной емкостной компенсации до 5–6 Мвар для повышения пропускной способности следует устанавливать переключаемые фильтрокомпенсирующие установки. С учетом реальных нагрузок такое решение будет реализовано на большинстве постов секционирования. Для мощности установок более 5–6 Мвар следует рассмотреть вариант использования статического генератора реактивной мощности пониженной мощности: при больших нагрузках его эффективность увеличится.

**Ключевые слова:** система электроснабжения; поперечная емкостная компенсация; регулируемые установки; пропускная способность; статический генератор реактивной мощности; переключаемая фильтрокомпенсирующая установка; экономическая эффективность

**Введение.** Стратегия развития железнодорожного транспорта в России предусматривает повыше-

ние весовых норм, позволяющих обеспечить возрастающие объемы грузовых перевозок. Распоряжением ОАО «РЖД» № 1799р от 1 сентября 2016 г. введенная в действие инструкция по организации обращения грузовых поездов повышенной массы и длины и соединенных поездов «...направлена на повышение пропускной и провозной способности участков и направлений...». Однако указанная категория поездов на ряде участков вызывает снижение напряжения на токоприемнике электровоза и, как следствие, скорости движения.

В соответствии с Инструкцией [1] пропускная способность зависит от фактического напряжения на токоприемнике электровоза и надежности технических средств, и в частности в электроснабжении. Остановимся лишь на регулируемых установках поперечной емкостной компенсации в тяговых сетях железных дорог переменного тока систем 25 и 2×25 кВ. Об эффективности поперечной емкостной компенсации в реализации повышенной пропускной способности железной дороги неоднократно указывалось в публикациях [2–4]. По предложению руководства АО «Трансэнерго» — филиала ОАО «РЖД» с 2015 г. внедряются статические генераторы реактивной мощности — СГРМ (включены в работу на Западно-Сибирской, Северной и Горьковской железных дорогах), о которых, в частности в [4], сказано: «... Их основное преимущество — эффективное снижение потерь напряжения и мощности в контактной сети, позволяющее решать вопросы усиления пропускной способности участка железной дороги за счет сокращения интервалов попутного следования поездов. Перспектива использования ФКУ — расшивка узких мест по уровню напряжения на ряде участков Восточного полигона без строительства тяговых подстанций, что на порядок снижает инвестиционные затраты». Одновременно на Горьковской железной дороге, на самом тяжелом консольном участке тяговой сети системы 2×25 кВ, уже семь лет успешно работает регулируемая переключаемая фильтрокомпенсирующая установка (ФКУ), созданная по разработкам специалистов

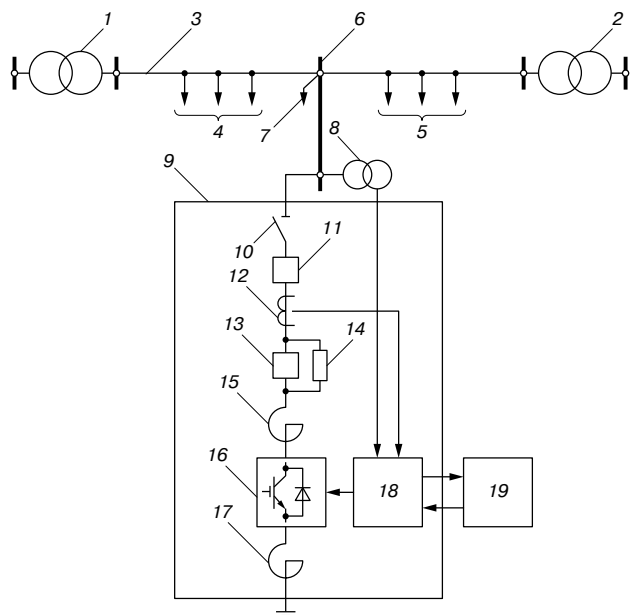


Рис. 1. СГРМ, подключенный на посту секционирования:

1 и 2 — левая и правая тяговые подстанции рассматриваемой межподстанционной зоны соответственно; 3 — тяговая сеть; 4 и 5 — тяговые нагрузки левого и правого участков рассматриваемой зоны относительно поста секционирования (ПС); 6 — шины ПС; 7 — фиктивная нагрузка ПС, полученная разнесением тяговой нагрузки между подстанциями и ПС; 8 — измерительный трансформатор напряжения на ПС; 9 — генератор СГРМ; 10 — разъединитель в цепи устройства СГРМ; 12 — измерительный трансформатор тока в цепи устройства СГРМ; 13 — вакуумный выключатель, шунтированный резистором 14 в цепи СГРМ; 14 — токоограничивающий резистор заряда; 15 — вводный реактор в цепи устройства СГРМ; 16 — блок силовых ячеек в цепи устройства СГРМ; 17 — выходной реактор в цепи устройства СГРМ; 18 — шкаф управления устройством СГРМ; 19 — расчетный блок

Fig. 1. Static reactive power generator (SRPG) connected to the sectioning post:

1 and 2 — left and right traction substations of the considered inter-substation zone, respectively; 3 — traction network; 4 and 5 — traction loads of the left and right sections of the considered zone relative to the sectioning post (SP); 6 — SP buses; 7 — fictitious load of the substation, obtained by dividing the traction load between the substations and SP; 8 — measuring voltage transformer at SP; 9 — SRPG generator; 10 — disconnecter in the circuit of the SRPG device; 11 — vacuum switch in the circuit of the SRPG device; 12 — measuring current transformer in the circuit of the SRPG device; 13 — vacuum switch shunted by a resistor 14 in the SRPG circuit; 14 — current-limiting charge resistor; 15 — lead-in reactor in the circuit of the SRPG device; 16 — block of power cells in the circuit of the SRPG device; 17 — output reactor in the circuit of the SRPG device; 18 — control cabinet for the SRPG device; 19 — calculated block

дороги совместно с Нижегородским филиалом СамГУПС, которая решила проблемы повышения пропускной способности данного участка [5–9]. Далее рассмотрены характеристики указанных установок и предложены области применения их в системе тягового электроснабжения.

**Установки поперечной емкостной компенсации в тяговой сети.** Самый эффективный способ повышения пропускной способности — использование компенсирующих установок (КУ) на постах секционирования

(ПС). На железных дорогах с 1970 г. с целью повышения напряжения и снижения потерь мощности в тяговой сети стали применять КУ на ПС. Ранее КУ были нерегулируемыми, и поэтому при снижении тяговой нагрузки напряжение на КУ повышалось и в ряде случаев превосходило предельно допускаемое — 29 кВ. В результате КУ аварийно отключались или приходилось поддерживать заниженное напряжение на тяговых подстанциях. Для решения указанной проблемы необходимо было оснащать ПС регулируемые КУ. В настоящее время известны два типа регулируемых КУ: СГРМ на биполярных транзисторах и переключаемая ФКУ с тиристорным ключом, разработанная на основании типового варианта компенсации реактивной мощности путем добавления второй секции с шунтирующим выключателем. Рассмотрим их более подробно.

**СГРМ.** В настоящее время на ПС начали включать СГРМ серии «RU-DRIVE SVG», изготовитель ООО НПП «РУ-Инжиниринг», которые доказали свою эффективность в повышении пропускной способности участков железной дороги (рис. 1). Основное предназначение СГРМ заключается в снижении колебаний напряжения в тяговой сети за счет компенсации реактивного тока тяговой нагрузки. СГРМ выполнен по схеме четырехквadrатного преобразователя напряжения типа 4QS на основе силовых транзисторных модулей IGBT. В зависимости от направления потока электрической энергии он выполняет функции как автономного инвертора напряжения, так и выпрямителя и представляет собой модульный многоуровневый инвертор, состоящий из 28 силовых модулей H-мостов с конденсаторами  $C_1$ – $C_n$ . Данное устройство можно рассматривать как управляемый источник тока. Полное выходное напряжение является суммой выходных напряжений отдельных модулей H-мостов. Каждое отдельное выходное напряжение модуля получается с использованием широтно-импульсной модуляции со сдвигом фазы коммутации для каждого моста. СГРМ выполняет функции компенсации реактивной мощности, стабилизации напряжения в точке его подключения, а также мощного активного фильтра. В последнем случае для фильтрации гармоник мощность СГРМ по данным реально работающих генераторов увеличена на 35–37 %. В связи с наличием биполярных транзисторов в СГРМ установлены мощные постоянно работающие вентиляторы потребляемой мощности 40 кВт, в связи с чем на ПС ежемесячно выезжает бригада по их обслуживанию.

В СГРМ входит следующее силовое оборудование: главный выключатель  $QF1$  с трансформатором тока ТА, разъединители  $QS1$  и  $QS2$ , демпфирующий резистор  $QF2$  и реакторы  $L1$  и  $L2$ . Номинальная мощность составляет 6,7; 10 и 15 Мвар. При этом гальваническая развязка цепей управления в устройствах обеспечивается оптоволоконными линиями связи.

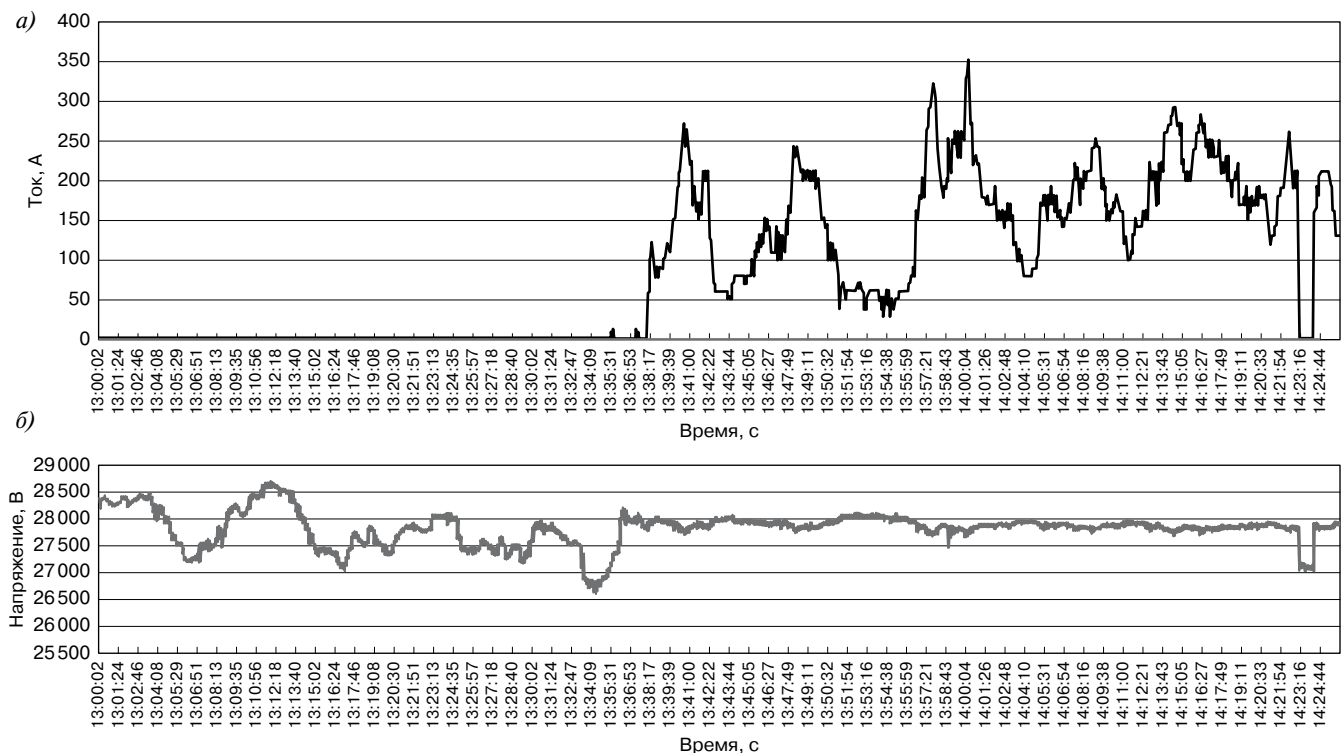


Рис. 2. Ток СГРМ (а) и напряжение на шине ПС (б)  
Fig. 2. SRPG current (a) and voltage on the SP bus (b)

Внедрение СГРМ на ПС тяговой сети переменного тока кардинально решает проблемы пропускной способности железных дорог. При этом по опыту Западно-Сибирской, Северной и Горьковской железных дорог увеличивается число тяжеловесных и двояльных поездов в сутки на 10–25 составов и поддерживаются нормативные значения напряжения. Эффективность стабилизации напряжения в тяговой сети с помощью СГРМ демонстрирует осциллограмма, зафиксированная на ПС Оричи Горьковской железной дороги (рис. 2): до момента 13 ч 36 мин 53 с СГРМ был отключен, и напряжение изменялось в пределах 26,6–28,6 кВ (рис. 2, б). При включении СГРМ напряжение стабилизировалось.

Контроль тяговой нагрузки для регулирования мощности СГРМ осуществляется косвенно — по уровню напряжения на шинах ПС, поэтому не всегда происходит полная компенсация реактивной нагрузки, а зачастую наблюдается и режим перекомпенсации нагрузки, отнесенной к ПС. Это приводит к повышенным значениям потерь мощности в тяговой сети [2].

В связи с указанным предлагается использовать микропроцессорные терминалы ИнТер (НИИ ЭФА-ЭНЕРГО) для контроля гармонических составляющих напряжения на шинах ПС с последующим расчетом гармонических составляющих тока, включая первую гармоническую. Тогда требования регулирования мощности СГРМ можно выполнить по третьей

гармонике тока нагрузки, по которой определяется компенсируемый ток первой гармоники установки компенсации [10].

В общем случае для осуществления эффективного электроснабжения железной дороги требования к устройствам автоматического регулирования мощности установки поперечной емкостной компенсации на ПС определяются следующими соображениями:

1. Необходимо повысить напряжение на шинах ПС. При этом напряжение на токоприемнике должно удовлетворять требованиям нормативных документов (21 кВ в общем случае и 24 кВ — для скоростных участков). Кроме того, дополнительно устанавливается условие: для повышения пропускной способности участка следует повысить напряжение в контактной сети так, чтобы пропустить заданное число поездов, включая тяжеловесные и двояльные.

2. Одновременно следует минимизировать потери электроэнергии, а это значит, что следует выбрать на шинах ПС такой уровень напряжения, при котором будет обеспечена заданная пропускная способность при минимальной потере электроэнергии в тяговой сети.

Далее ограничимся этими двумя существенными требованиями к задаче регулирования мощности установки на ПС.

В настоящее время на электрифицированных участках железной дороги приняты требования регулирования мощности СГРМ, отмеченные в инструкции

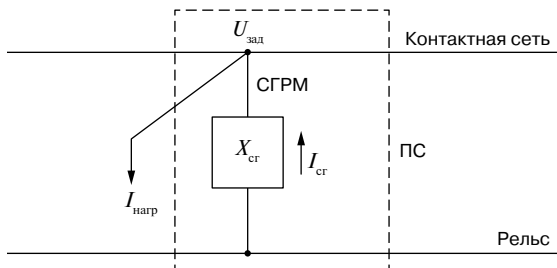


Рис. 3. Схема замещения СГРМ в тяговой сети  
Fig. 3. SRPG substitution scheme in the traction network

завода-изготовителя как «регулирование напряжения». В данном режиме в соответствии с верхним и нижним пределом напряжения, установленным в настройках параметров, генератор «RU-DRIVE SVG» автоматически регулирует выходную мощность, тем самым осуществляя регулирование и стабилизацию напряжения на шинах ПС на заданном уровне  $U_{\text{зад}}$  (обычно от 27 до 28 кВ). В частности, на СГРМ ПС Оричи Горьковской железной дороги установлено  $U_{\text{зад}} = 28$  кВ, а на СГРМ Северной железной дороги — 27 кВ.

Для расчета схемы электроснабжения определимся со схемой замещения межподстанционной зоны тяговой сети переменного тока с СГРМ на ПС.

Схему замещения СГРМ представим следующим образом (рис. 3).

Регулируемое емкостное сопротивление подключено к шине ПС, на котором установлено заданное напряжение  $U_{\text{зад}}$ , поддерживаемое СГРМ и которое генерирует ток  $I_{\text{сг}}$ . Ток нагрузки  $I_{\text{нагр}}$ , приходящийся на ПС, рассчитывается путем переноса (перераспределения) нагрузки тяговой сети между тяговыми подстанциями и ПС. Следует учесть, что этот ток нельзя замерить на ПС.

Представленная схема замещения позволяет выполнить расчет режима СГРМ в мгновенной схеме замещения.

Важно отметить, что трудности измерения тока нагрузки на ПС определяют погрешности расчета необходимого емкостного тока существующих СГРМ для эффективной компенсации реактивной мощности тяговой сети и, соответственно, генерирования емкостного тока. Предлагается расчет мгновенной схемы участка электроснабжения тяговой сети с СГРМ произвести в два шага. На первом шаге представим схему замещения СГРМ емкостным сопротивлением, значение которого определяется мощностью СГРМ. Если, например, мощность 10 Мвар, то сопротивление его, Ом, равно  $X_{\text{сг}} = 10^3 \times 0,65 / 27,5$ , где 0,65 — коэффициент, учитывающий увеличение мощности СГРМ для генерации инверсных гармоник. После расчета мгновенной схемы участка анализируют напряжение на шинах СГРМ: если это напряжение меньше заданного (обычно от 27 до 28 кВ), то на втором шаге

корректируют  $X_{\text{сг}}$  для получения заданного напряжения путем изменения емкостного сопротивления (отрицательное сопротивление), при этом изменяется ток и мощность СГРМ. Если же после расчета мгновенной схемы напряжение выше заданного, то заменяют емкостное сопротивление на индуктивное и изменяют его (регулируют положительное сопротивление) для достижения заданного напряжения. Обычно после второго шага напряжение на шинах соответствует заданному.

В связи с недостатками СГРМ (повышенные стоимость и потери мощности преобразователя) предлагается уменьшить мощность СГРМ в два раза и заменить изыятую мощность установкой традиционной нерегулируемой компенсации, при этом регулирование мощности последней осуществить установкой СГРМ в режиме генерации индуктивной мощности.

**Переключаемая ФКУ** выполнена на основании отечественных изобретений [5–9] и представляет принципиально новую схему регулируемой установки, так как регулируемые секции конденсаторов включены не параллельно с основной батареей, а последовательно (рис. 4).

Первая ступень наименьшей мощности состоит из последовательно включенных двух секций конденсаторных батарей и двух фильтровых реакторов. Каждая секция ФКУ настроена на резонансную частоту 140 Гц, что обеспечивает отсутствие резонансных явлений. Включение первой ступени в работу происходит следующим образом. При отключенных выключателях  $Q1, Q2, Q3$  включается главный выключатель  $Q1$ , а затем шунтируется демпфирующий резистор  $R$  включением выключателя  $Q2$ . Первая ступень для ФКУ на ПС обеспечивает допустимый режим напряжения при малых и средних нагрузках и рассчитывается с целью наибольшего снижения потерь электроэнергии в тяговой сети по формуле (3.1) [10].

Вторая ступень ФКУ наибольшей мощности состоит из включенной первой секции конденсаторной батареи  $C1$  и фильтрового реактора  $L$ . Включение в работу второй ступени ФКУ при включенной первой ступени происходит следующим образом. При включенном главном выключателе  $Q1$  отключается выключатель  $Q2$ , затем включается выключатель  $Q3$ . Вторая ступень рассчитывается по нормативному документу, указанному в [10], для обеспечения заданной пропускной способности по формуле (3.2) [10].

Схему можно реализовать и при одном реакторе. Если применить, например, реактор ФРОМ-3200 на 33,6 Ом и ток 230 А, то минимальную мощность можно сформировать на 3 Мвар, а максимальная мощность может быть на 4–6 Мвар. Если в схеме два реактора, то соотношение мощностей может быть любым. При соотношении максимальной мощности к минимальной более чем в два раза напряжение на выключателе  $Q2$  не будет превышать  $U_{\text{ш}}/3$ , где  $U_{\text{ш}}$  — напряжение на



шинах ФКУ (принимая  $U_{\text{н}} = 27,5\text{--}29\text{ кВ}$ ). Таким образом, оправдано напряжение 10 кВ выключателя  $Q2$ .

Отметим важное преимущество по надежности представленной схемы. Расчеты и опыт эксплуатации показали, что в режиме минимальной мощности ФКУ работает 60–80 % всего времени. Срок службы конденсаторов зависит от их напряжения [2]. Расчеты показывают, что снижение напряжения до указанных значений повышает ресурс работы в десятки раз. Вот почему в условиях эксплуатации рекомендуется переводить существующие работающие много лет установки поперечной емкостной компенсации в переключаемые.

Подведем некоторые итоги эксплуатации переключаемой ФКУ мощностью 4,6 Мвар в тяговой сети участка Сергач—Шумерля системы  $2 \times 25\text{ кВ}$  Горьковской железной дороги, более 7 лет установленной на консоли тяговой сети: нормализация напряжения в тяговой сети позволила пропускать запланированные по графику тяжеловесные и сдвоенные поезда, переключаемая установка эффективно снижает потери мощности в тяговой сети, нет никаких претензий по надежности работы установки. Переключение ФКУ на максимальную мощность ограничили в среднем до 4–6 раз в сутки, для этого специально настроена автоматика переключения. Практика показала достаточность этих переключений, так как тяжеловесные поезда (а их 10–13 единиц в сутки и более), как правило, проходят пачками. Тем не менее необходимость увеличения мощности этой переключаемой ФКУ до 6–7 Мвар уже очевидна.

На наш взгляд, учитывая, что для условий тягового электроснабжения плавное регулирование мощности ФКУ можно заменить ступенчатым, а скорость переключения напряжения не имеет решающего преимущества, схему ФКУ можно упростить, приводя к приемлемым стоимостным показателям, что демонстрирует приведенная переключаемая ФКУ. Кроме того, предлагаемый вариант переключаемой ФКУ не генерирует гармоники, а шунтирует их, не пропуская в энергосистему, приемлем по потерям активной мощности и эффективен в снижении потерь мощности в тяговой сети, а также надежен в работе. В связи со сравнительно большим диапазоном допустимого напряжения в контактной сети (21 (24)–29 кВ) при ступенчатом регулировании всегда есть возможность обеспечить указанный допустимый диапазон.

Переключение секций происходит всегда с предварительным введением демпфирующего резистора. Так как напряжение на шунтирующем выключателе не превышает 8–10 кВ, то ток разряда конденсаторов через резистор не превышает  $8000 \div 10\,000 / 100 = 80 \div 100\text{ А}$  (где 100 Ом в знаменателе — сопротивление демпфирующего резистора), что меньше тока конденсаторов, поэтому переключения происходят спокойно без перегрузок. Важно отметить ограничен-

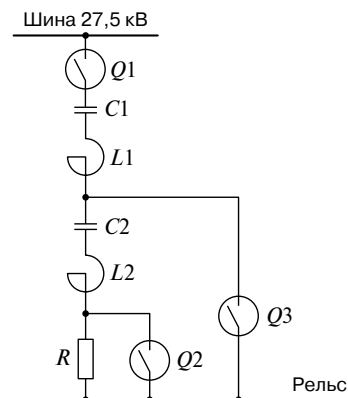


Рис. 4. Схема переключаемой ФКУ с вакуумными выключателями:  $Q1$  — главный выключатель;  $C1$  — конденсаторная батарея первой секции;  $L1$  — фильтровый реактор первой секции;  $C2$  — конденсаторная батарея второй секции;  $L2$  — фильтровый реактор второй секции;  $R$  — демпфирующий резистор;  $Q2$  — выключатель 10-кВ демпфирующего резистора;  $Q3$  — выключатель 10-кВ второй секции ФКУ

Fig. 4. Scheme of a switchable filter-compensating installation (FCI) with vacuum switches:

$Q1$  — main switch;  $C1$  — capacitor bank of the first section;  $L1$  — filter reactor of the first section;  $C2$  — capacitor bank of the second section;  $L2$  — filter reactor of the second section;  $R$  — damping resistor;  $Q2$  — 10kV damping resistor switch;  $Q3$  — 10kV switch of the second section of the FCI

ные броски напряжения при переключении ступеней. Во-первых, переключается лишь дополнительная мощность ФКУ (а не вся мощность ФКУ), и во-вторых, на первом этапе раньше включается вторая ступень с ограничительным резистором, который затем через 0,3–1,0 с шунтируется, и напряжение повышается на 0,3–0,7 кВ. Далее на втором этапе происходит переключение на первую ступень, т. е. шунтирование второй секции, и при мощности ФКУ до 5–6 Мвар напряжение повышается еще на 0,3–0,7 кВ. Однако при больших мощностях ФКУ (6,7–10–15 Мвар) увеличение напряжения в тяговой сети при переключении может достигать 2–3 кВ. Поэтому при больших мощностях ФКУ введение тиристорного ключа вместо вакуумного выключателя (рис. 5) обязательно, и тогда броски напряжения при переключении будут снижаться.

Тиристорный ключ (ТК) шунтирует вторую секцию  $C2\text{--}L2$  конденсаторной батареи при больших тяговых нагрузках. Включение тиристорного ключа происходит постепенно за счет его фазового регулирования блоком управления (БУ) [9] при контроле фазы тока установки трансформатором тока (ТТ). Таким образом, время постепенного повышения напряжения на шинах установки при включении тиристора можно удлинить до 0,5–10 с. На наш взгляд, целесообразно установить время задержки повышения напряжения до 2–3 с, что не отразится на устойчивости работы электроваз, так как будут исключены импульсные броски напряжения значительной величины (до 1,0–1,6 кВ) при переключении секций ФКУ.

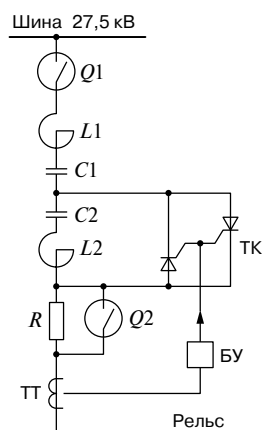


Рис. 5. Схема переключаемой ФКУ с тиристорным ключом:  
ТК — тиристорный ключ; БУ — блок управления;  
ТТ — трансформатор тока

Fig. 5. Scheme of switchable FCI with a thyristor switch:  
ТК — thyristor switch; БУ — control unit; ТТ — current transformer

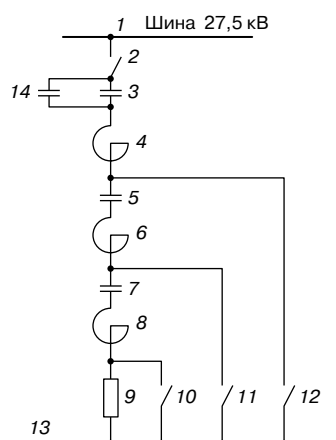


Рис. 6. Схема трехступенчатой ФКУ:  
1 — контактная сеть; 3–14–4, 5–6, 7–8 — секции конденсаторов с реакторами; 2, 10, 11, 12 — коммутационные аппараты;  
9 — пусковой резистор; 13 — рельс

Fig. 6. Three-stage FCI scheme:  
1 — contact network; 3–14–4, 5–6, 7–8 — sections of condensers with reactors; 2, 10, 11, 12 — switching devices; 9 — starting resistor; 13 — rail

**Трехступенчатая ФКУ.** Наибольшая эффективность ФКУ в тяговой сети переменного тока межподстанционной зоны, где установлена ФКУ (например, на ПС), по снижению потерь электроэнергии будет в том случае, если ее мощность равна половине реактивной мощности тяговой нагрузки этой зоны [2]. Конечно, при плавно регулируемой ФКУ или при большом количестве ступеней мощности эффект ФКУ по снижению потерь мощности будет повышаться. Однако по технико-экономическим соображениям [2, 10] с учетом повышенной стоимости регулируемых уста-

новок и, главное, с учетом снижения положительного эффекта от каждой последующей включенной ступени увеличение числа ступеней (более 3) нецелесообразно, что неоднократно подтверждается в технической литературе [11]. Поэтому предлагается вариант трехступенчатой однофазной ФКУ, рационально снижающей потери электроэнергии в тяговой сети и повышающей пропускную способность участка железной дороги (рис. 6). По сравнению с установкой с двумя ступенями мощности в трехступенчатой ФКУ три ступени мощности, следовательно более строго будет выполняться требование по снижению потерь мощности в тяговой сети. При повышении нагрузки в тяговой сети понижается напряжение на шинах ФКУ, и тогда следует увеличить ее мощность для повышения напряжения в тяговой сети и, соответственно, для снижения потерь мощности.

Для увеличения мощности при напряжении на шинах ФКУ 27–29 кВ в работу включается первая ступень ФКУ наименьшей мощности, при напряжении 24–27 кВ — вторая ступень, обеспечивающая максимальное снижение потерь мощности в диапазоне средних тяговых нагрузок, и при напряжении 21–24 кВ — третья ступень повышенной мощности. Для конкретных участков указанные напряжения переключения секций ФКУ корректируются.

Число ступеней ФКУ определяется в зависимости от схемы питания тяговой сети и характеристики тяговой нагрузки конкретного участка.

**Уровень напряжения** — основная характеристика, приводящая к повышению пропускной способности участка. Тиристорный ключ позволяет в любой момент времени поддерживать повышенное напряжение. Оценим требуемую мощность КУ. Пусть на токоприемнике тяжеловесного состава зафиксировано пониженное напряжение  $U_{ф.мин}$ , которое следует повысить до желательного  $U_{ж*}$ . КУ повышает напряжение на  $I_{ку} X_{вх}$ , где  $I_{ку}$  — генерируемый ток КУ,  $X_{вх}$  — входное сопротивление КУ. Считая полученный ток предельным для КУ, можно определить номинальную мощность КУ для повышения ее пропускной способности:

$$Q_{ку.ном} = (U_{ж*} - U_{ф.мин}) U_{ку.ном} / X_{вх}. \quad (1)$$

На наш взгляд, при прохождении тяжеловесных поездов и, соответственно, при низких значениях напряжения КУ должна повысить напряжение в тяговой сети по крайней мере до номинального, т. е. до 25 кВ, при котором характеристики электровоза будут наилучшими.

Рассчитаем необходимую мощность КУ при минимальных напряжениях в тяговой сети. Например,  $U_{ф.мин} = 21$  и 23 кВ, а желательное напряжение  $U_{ж*}$  до

которого следует повысить минимальное напряжение, принимаем в 24, 25, 27 кВ (таблица). При этом рассмотрим два варианта питания тяговой сети: двухстороннее, с включением КУ на ПС (входное сопротивление — 8 Ом) и консольное, с включением КУ на консоли (входное сопротивление — 12 Ом). Конечно, с увеличением принятого минимального напряжения  $U_{\phi, \min}$  напряжение в тяговой сети будет выше  $U_{\text{ж}}$ , т. е. выше 24–27 кВ.

Из таблицы следует, что при повышении напряжения с 21 до 24–25 кВ необходимая мощность КУ ПС составляет 10,32–13,76 Мвар, а при одностороннем питании мощность КУ в конце зоны — 3,87–5,15 Мвар.

Для того чтобы установить по указанным расчетам номинальную мощность КУ, следует знать, как часто в течение суток появляется предельное значение напряжения в 21 кВ. Другими словами, следует определить вероятностные характеристики минимального напряжения. Предлагается по опыту применения вероятностных характеристик в ГОСТ на нормативы показателей качества электроэнергии (ГОСТ Р 54149–2010) использовать аналогичные характеристики при определении мощности КУ для повышения пропускной способности электрифицированных участков. Это значит, что для задачи повышения пропускной способности по устройствам электроснабжения следует определять наименьшее напряжение в сутках  $U_{\phi, \min}$  с вероятностью 95 % и по этим данным рассчитывать номинальную мощность КУ.

Очевидно, что с увеличением  $U_{\text{ж}}$  будут лучшие условия повышения пропускной способности. Однако следует учесть, что при повышении напряжения свыше 25 кВ резко возрастает реактивная мощность ЭПС, кроме того, при повышенных напряжениях увеличиваются периоды перекомпенсации реактивной мощности в тяговой сети, что ведет к повышенным значениям потери мощности. Поэтому необходимо более тщательно проверять все затраты при повышении напряжения до 26, 27, 28 кВ. Кстати, по программе КОРТЭС возможно проверять характеристики тяговой сети при повышенных напряжениях.

В частности, по опыту работы СГРМ на Западно-Сибирской, Северной и Горьковской железных дорогах принятый уровень напряжения  $U_{\text{ж}}$ , равный 27 кВ (Северная) и 28 кВ (Горьковская), по всей видимости, близок к оптимальному, хотя проведенные расчеты [10] указали на целесообразность установки  $U_{\text{ж}}$ , равного 27 кВ. Опытные расчеты КУ ПС различных участков Горьковской железной дороги для повышения пропускной способности показали, что для большинства участков с двухсторонним питанием тяговой сети достаточны мощности 6–10 Мвар.

При рассмотрении переключаемой ФКУ с двумя секциями алгоритм регулирования обеспечива-

Результаты расчета требуемой мощности КУ  
Results of calculating the required power of compensating installation

| $X_{\text{вх}}$ , Ом | $U_{\phi, \min}$ , кВ | Мощность, Мвар, при величине $U_{\text{ж}}$ |       |       |
|----------------------|-----------------------|---------------------------------------------|-------|-------|
|                      |                       | 24 кВ                                       | 25 кВ | 27 кВ |
| 8                    | 21                    | 10,32                                       | 13,76 | 17,2  |
| 12                   | 21                    | 3,87                                        | 5,16  | 6,45  |
| 8                    | 23                    | 3,44                                        | 6,88  | 13,76 |
| 12                   | 23                    | 1,29                                        | 2,58  | 5,16  |

ет ступенчатое изменение напряжения, в частности при мощности  $Q_{\text{ку}}$  в 10 Мвар оно повышается до 3 кВ. Указанное напряжение обеспечит нормальную работу электровоза, при этом в зависимости от режима работы электровоза с помощью его контроллера будет отрегулировано соответствующее напряжение на тяговых двигателях. Как указано ранее, напряжение будет повышаться не скачком, а постепенно, примерно за 1–3 с, что благоприятно скажется на работе схемы электровоза.

**Уменьшение несинусоидальности тока и напряжения в тяговой сети.** Традиционные нерегулируемые установки компенсации на тяговых подстанциях, включаемые резонансным фильтром на 150 Гц, снижают полный коэффициент гармоник напряжения примерно в полтора раза, а при наличии фильтров на 150 и 250 Гц — в три раза. При этом гармоники напряжения в точке включения фильтров на 150 и 250 Гц снижаются до нуля. Значение гармоник напряжения на шинах тяговых подстанций прежде всего зависит от мощности энергосистемы, и поэтому недопустимый уровень гармонических составляющих напряжения, кроме всего прочего, бывает в системах при малых значениях мощности короткого замыкания на шинах 110 (220) кВ (на уровне 500–700 МВА). При включении этих установок не на подстанции, а на ПС эффективность их снижается примерно в два раза, так как к ПС «относится» только половина тяговой нагрузки межподстанционной зоны, у которой и будут компенсироваться гармонические составляющие.

Другая ситуация складывается с гармоническими составляющими при включении СГРМ. У них надо специально формировать генерацию соответствующих гармоник в противофазе, увеличивая тем самым мощность СГРМ. По опыту применения СГРМ в тяговой сети мощность на генерацию гармоник составляет 35–37 %, поэтому при проектировании следует оценить, насколько эффективна генерация гармоник в СГРМ и не лучше ли эту задачу снижения гармонических составляющих поручить резонансным фильтрам. Кроме того, следует учесть тот факт, что в точке подключения СГРМ будут генерироваться соответствующие гармоники для компенсации гармоник, как правило, удаленных электровозов. Таким образом, в указанной точке будет

формироваться неблагоприятная электромагнитная обстановка, негативно влияющая на работу устройств сигнализации, централизации и блокировки.

**Снижение потерь мощности в тяговой сети.** В [12, 13] указаны возможности снижения активных потерь мощности с помощью установок компенсации реактивной мощности на ПС. Нерегулируемые установки снижают потери мощности в тяговой сети на 12,8–13,4 % при их мощности, равной половине потребляемой реактивной мощности электроподвижного состава в межподстанционной зоне, а собственные потери (в конденсаторах и реакторе) в установке не превышают в среднем 15 кВт. Плавно регулируемые установки (например, СГРМ) снижают потери на 15,5–21 %, но собственные потери в соответствии с инструкцией составляют 45 кВт. Поэтому такое снижение потерь для СГРМ теоретически возможно при настройке автоматики на полную компенсацию реактивной мощности в тяговой сети. К сожалению, существующая автоматика настроена только на стабилизацию повышенного напряжения в тяговой сети.

С учетом периодической перекомпенсации реактивной мощности работа регулируемой компенсации СГРМ малоэффективна в снижении потерь активной мощности. В инструкции по эксплуатации СГРМ предлагается учесть снижение потерь мощности в тяговой сети на 0,1 % от средней мощности тяговой нагрузки межподстанционной зоны. Однако, как показала практика работы СГРМ, постоянная перекомпенсация реактивной мощности и пониженные значения коэффициента реактивной мощности на смежных тяговых подстанциях не дают основания учитывать указанное уменьшение потерь мощности.

У переключаемой ФКУ, учитывая одноступенчатый характер регулирования, снижение потерь мощности будет составлять 14–14,5 %. Кроме того, у переключаемой ФКУ, исходя из опыта ее применения на Горьковской железной дороге, не отмечены режимы перекомпенсации, и поэтому есть все основания учесть снижение потерь мощности. Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод об отсутствии преимуществ

СГРМ в снижении потерь мощности перед переключаемой ФКУ.

**Применение установки компенсации в схеме штатного раздела по контактной сети переменного тока.** На Горьковской железной дороге, как и на других железных дорогах, примерно для 7–10 % межподстанционных зон требуется раздел питания по контактной сети из-за больших перепадов мощности между подстанциями при их параллельной работе, что ведет к значительным потерям электроэнергии. Обычно такой раздел осуществляют у ПС с введением нейтральной вставки в контактной сети систем 25 и 2×25 кВ. Практика показала, что введение еще одной нейтральной вставки у ПС, как правило, приводит к снижению скорости движения при ее проходе, поэтому на Горьковской железной дороге для раздела контактной сети между двумя подстанциями при стыковании двух энергосистем решили ограничиться нейтральной вставкой у тяговой подстанции [10], а два фидера контактной сети у подстанции оставить в отключенном состоянии, т. е. перешли на консольное питание тяговой сети (рис. 7), для нормализации напряжения включили регулирующую переключаемую ФКУ (рис. 7, поз. 1) через пункт параллельного соединения 2. Такая схема питания успешно работает более семи лет в системе энергоснабжения 2×25 кВ, обеспечивая повышенную пропускную способность участка Сергач–Шумерля. Таким образом, это еще один пример положительного использования установки компенсации реактивной мощности.

**Экспресс-метод расчета эффекта от увеличения пропускной способности межподстанционной зоны.** Расчет проведем по формуле

$$\Delta \Theta = \Delta t T_{\text{год}} m C / 60, \text{ руб.}, \quad (2)$$

где  $\Delta t$  — разность времени хода тяжеловесных поездов с ФКУ и без ФКУ в мин, или  $\Delta t / 60$ , ч;  $T_{\text{год}}$  — число суток в году (365);  $m$  — число тяжеловесных поездов в сутки;  $C$  — затраты на пропуск тяжеловесного поезда, руб./поездо-ч.

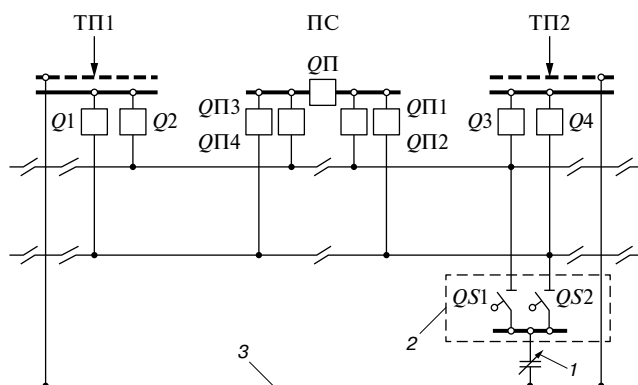


Рис. 7. Схема установки компенсации реактивной мощности для обеспечения раздела питания по контактной сети: 1 — регулируемая переключаемая ФКУ; 2 — пункт параллельного соединения; 3 — контактная сеть; ТП1, ТП2 — тяговые подстанции; QП1...QП4 — выключатели ПС; Q1...Q4 — выключатели тяговых подстанций; QS1...QS2 — управляемые разъединители

Fig. 7. Scheme of reactive power compensation installation to ensure the power supply section over the catenary network: 1 — adjustable switchable FCI; 2 — point of parallel connection; 3 — contact network; ТП1, ТП2 — traction substations; QП1...QП4 — SP switches; Q1...Q4 — traction substation switches; QS1...QS2 — operable disconnectors



Расчет выполняется в следующей последовательности:

1. Вычисляется время хода тяжеловесного поезда по межподстанционной зоне до ( $t_1$ ) и после ( $t_2$ ) включения ФКУ. Рассчитывается разность времени  $\Delta t = (t_1 - t_2) / 60$ , ч.

2. Определяются затраты на пропуск тяжеловесного поезда в соответствии с [14]. Стоимость 1 поездоч в грузовом движении (электротяга) для Горьковской железной дороги (для оценки изменения скорости движения) составляет 8441,35 руб.

3. Выполняется расчет экономии денежных средств в связи с уменьшением времени хода тяжеловесного поезда по рассматриваемой межподстанционной зоне: если  $\Delta t / 60 = 5 / 60$  ч,  $m = 20$ ,  $C = 8441,35$  руб./поездо-ч, то эффект от повышения пропускной способности составит  $\Delta \Delta = 3$  млн руб. Если в расчетах ограничиться эффектом только по пропускной способности  $\Delta \Delta$ , то простой срок окупаемости для переключаемой ФКУ (ПФКУ)  $T_{ок} = K_{ПФКУ} / \Delta \Delta$  при стоимости ПФКУ мощностью 10 Мвар 18–20 млн руб. составит 6–6,6 лет. Для СГРМ срок окупаемости значительно больше, так как стоимость СГРМ мощностью 10 Мвар — 150 млн руб.

**Выводы.** 1. По техническим характеристикам переключаемая ФКУ с тиристорным ключом не уступает СГРМ в части повышения пропускной способности, а по некоторым показателям превосходит его. В целом по сроку окупаемости переключаемая ФКУ превосходит СГРМ в связи с высокой себестоимостью последнего.

2. Предлагается уменьшить мощность СГРМ путем замены части ее генерируемой реактивной мощности установкой традиционной нерегулируемой компенсации, включенной параллельно с СГРМ, при этом регулирование нерегулируемой установки осуществлять с помощью СГРМ в режиме генерации индуктивной мощности.

3. В связи с высокой себестоимостью СГРМ предлагаются следующие варианты использования рассматриваемых установок. При необходимой мощности установок поперечной емкостной компенсации до 5–6 Мвар, рассчитанной для повышения пропускной способности, следует применять переключаемые ФКУ. С учетом реальных нагрузок такое решение будет реализовано на большинстве отечественных ПС, т. е. будет осуществлено массовое решение. Для мощности установок более 5–6 Мвар следует рассмотреть вариант включения СГРМ пониженной мощности: при больших нагрузках его эффективность увеличится.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог: утв. Министерством путей сообщения СССР 24.04.1989. М.: Транспорт, 1991. 302 с.
2. Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установочной емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог: учеб. пособие. М.: ФГБУ ДПО «УМЦ ЖДТ», 2015. 316 с.
3. Герман Л.А. Эффективность регулируемых малоступенчатых фильтрокомпенсирующих установок в тяговой сети переменного тока // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2018. Т. 77. № 5. С. 288–294. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-288-294>.
4. Гапанович В.А. Результаты внедрения научно-технических работ и задачи на 2017 год // Железнодорожный транспорт. 2017. № 2. С. 24–28.
5. Устройство переключаемой однофазной поперечной емкостной компенсации в тяговой сети переменного тока: пат. 2475912 Рос. Федерация: МПК H02N 3/00 / А.С. Серебряков [и др.]. № 2011108818/07; заявл. 09.03.2011; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5.
6. Переключаемая фильтрокомпенсирующая установка: пат. 2733071 Рос. Федерация: МПК H01N 83/00 / А.С. Серебряков [и др.]. № 2020110769; заявл. 13.03.2020; опубл. 29.09.2020, Бюл. № 28.
7. Переключаемая фильтрокомпенсирующая установка: пат. 2710022 Рос. Федерация: МПК H02J 3/16 / А.С. Серебряков [и др.]. № 2019108108; заявл. 21.03.2019; опубл. 24.12.2019, Бюл. № 36.
8. Трехступенчатая фильтрокомпенсирующая установка тяговой сети переменного тока: пат. 2704023 Рос. Федерация: МПК H02N 7/16 / А.С. Серебряков [и др.]. № 2019108106; заявл. 21.03.2019; опубл. 23.10.2019, Бюл. № 30.
9. Переключаемая фильтрокомпенсирующая установка: пат. 2739329 Рос. Федерация: МПК H02J 3/18 / А.С. Серебряков [и др.]. № 2020126267; заявл. 06.08.2020; опубл. 22.12.2020, Бюл. № 36.
10. Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. Ч. 2. Режимная автоматика / Самарский гос. ун-т путей сообщения в г. Нижний Новгород. Нижний Новгород, 2020. 192 с.
11. Каялов Г.М., Ковалев И.Н. Расчет компенсации реактивных нагрузок регулируемыми конденсаторными батареями // Электричество. 1971. № 8. С. 19–25.
12. Герман Л.А., Серебряков А.С. Снижение потерь электроэнергии при помощи установок компенсации реактивной мощности на посту секционирования тяговой сети переменного тока // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2019. Т. 78. № 5. С. 297–302. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-5-297-302>.
13. Герман Л.А. Уменьшение потерь электроэнергии установками поперечной емкостной компенсации в тяговой сети // Труды МИИТ. М.: Транспорт, 1976. № 302. С. 69–82.
14. Об утверждении расходных ставок и оценочных уровней затрат для экономических задач: распоряжение ст. вице-президента ОАО «РЖД» В.В. Михайлова от 7 апреля 2017 г. № 675р.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**ГЕРМАН Леонид Абрамович**,  
д-р техн. наук, профессор, филиал ФГБОУ ВО «СамГУПС» в Нижнем Новгороде

Статья поступила в редакцию 21.01.2021 г., принята к публикации 15.02.2021 г.

**Для цитирования:** Герман Л.А. Повышение пропускной способности железной дороги с установкой компенсации реактивной мощности // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2021. Т. 80. № 1. С. 35–44. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-35-44>.

## Increasing railway capacity with the installation of reactive power compensation

L. A. GERMAN

Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Samara State University of Railways" in Nizhny Novgorod (Branch of FGBOU VO "SamGUPS" in Nizhny Novgorod), Nizhny Novgorod, 603011, Russia

**Abstract.** The article considers existing regulated installations of transverse capacitive compensation for increasing the capacity of sections of the traction network of 25 and 2×25 kV of Russian railways. Characteristics of a static reactive power generator based on bipolar IGBT transistors (manufactured by LLC NPP "RU-Engineering", Naberezhnye Chelny), a switchable filter-compensating unit (manufactured by the Gorkovskaya Railway and the Nizhny Novgorod branch of SamGUPS), a three-stage switchable filter-compensating unit. To increase the capacity, all installations are switched on at the traction network sectioning posts. Long-term operation of the static reactive power generator and switchable filter-compensating unit have proven their operational efficiency. At the same time, the following upgrades are proposed: in a static reactive power generator it is proposed to reduce the installed power, replacing it with unregulated compensation, and in a switchable filter-compensating installation, it is proposed to switch in 400–500 V steps to normalize the traction mode of the electric rolling stock.

It is shown that in terms of technical characteristics, a switchable filter-compensating installation with a thyristor switch is not inferior to a static generator of reactive power in terms of increasing the capacity, and in some respects it surpasses it. On the whole, in terms of payback period, a switchable filter-compensating installation surpasses a static generator of reactive power due to the high cost of the latter. The following options for using the considered installations are proposed. With the required power of transverse capacitive compensation units up to 5–6 MVar, to increase the capacity, switchable filter-compensating units should be installed. Taking into account real loads, such a solution will be implemented at most sectioning posts. For installations with a capacity of more than 5–6 MVar, the option of using a static reactive power generator of reduced power should be considered: at high loads, its efficiency will increase.

**Keywords:** power supply system; transverse capacitive compensation; adjustable installations; capacity; static generator of reactive power; switchable filter-compensating installation; economic efficiency

**DOI:** <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-35-44>

### REFERENCES

1. *Instructions for calculating the available capacity of railways*. Approved by the Ministry of Railways of the USSR dated April 24, 1989. Moscow, Transport Publ., 1991, 302 p. (in Russ.).
2. German L. A., Serebryakov A. S. *Reguliruemye ustanovki emkostnoy kompensatsii v sistemakh tyagovogo elektroobrazovaniya zheleznikh dorog. Ucheb. posobie* [Adjustable capacitive compensation installations in traction power supply systems of railways. Tutorial]. Moscow, FGBU DPO "UMTs ZhDT" Publ., 2015, 316 p.
3. German L. A. *Effektivnost' reguliruemyykh malostupenchatykh fil'tropensiruyushchikh ustanovok v tyagovoy seti peremennogo toka* [Efficiency of adjustable few-stage filter compensating installations in AC traction network]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2018, Vol. 77, no. 5, pp. 288–294. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-288-294>.

■ E-mail: [lagerman@mail.ru](mailto:lagerman@mail.ru) (L. A. German)

4. Gapanovich V. A. *Rezultaty vnedreniya nauchno-tekhnicheskikh rabot i zadachi na 2017 god* [Results of implementation of scientific and technical works and tasks for 2017]. Zheleznodorozhnyy transport, 2017, no. 2, pp. 24–28.

5. Dulepov D. E., German L. A., Serebryakov A. S., Semenov D. A. *Device for switchable single-phase transverse capacitive compensation in AC traction network*. Patent no. 2475912; publ. February 20, 2013, Bull. no. 5 (in Russ.).

6. Dulepov D. E., German L. A., Serebryakov A. S., Osokin A. S. *Switchable filter-compensating installation*. Patent no. 2733071; publ. September 29, 2020, Bull. no. 28 (in Russ.).

7. German L. A., Serebryakov A. S., Osokin A. S. *Switchable filter-compensating installation*. Patent no. 2710022; publ. December 24, 2019, Bull. no. 36 (in Russ.).

8. German L. A., Serebryakov A. S., Osokin A. S., Dmitrieva N. Yu. *Three-stage filter-compensating installation of the AC traction network*. Patent no. 2704023; publ. October 23, 2019, Bull. no. 30 (in Russ.).

9. Dulepov D. E., German L. A., Serebryakov A. S., Osokin A. S., Saevich V. L. *Switchable filter-compensating installation*. Patent no. 2739329; publ. December 22, 2020, Bull. no. 36 (in Russ.).

10. German L. A., Subkhanverdiev K. S., German V. L. *Avtomatizatsiya elektroobrazovaniya tyagovoy seti peremennogo toka. Ch. 2. Rezhimnaya avtomatika* [Automation of AC power supply. Part 2. Regime automation]. Nizhniy Novgorod, Samarskiy gos. un-t putey soobshcheniya v g. Nizhniy Novgorod [Samara State Transport University in the city of Nizhny Novgorod] Publ., 2020, 192 p.

11. Kayalov G. M., Kovalev I. N. *Raschet kompensatsii reaktivnykh nagruzok reguliruemymi kondensatornymi batareyami* [Calculation of compensation of reactive loads with adjustable capacitor batteries]. Elektrichestvo, 1971, no. 8, pp. 19–25.

12. German L. A., Serebryakov A. S. *Snizhenie poter' elektroenergii pri pomoshchi ustanovok kompensatsii reaktivnoy moshchnosti na postu sektionirovaniya tyagovoy seti peremennogo toka* [Reduction of electric power losses by the reactive power compensation unit at the point of AC electric traction network sectioning]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2019, Vol. 78, no. 5, pp. 297–302. DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-5-297-302>.

13. German L. A. *Reducing power losses by installations of transverse capacitive compensation in a traction network*. Proceedings of the MIIT. Moscow, Transport Publ., 1976, no. 302, pp. 69–82.

14. *On the approval of expenditure rates and estimated cost levels for economic tasks*. Order of V. V. Mikhailov, Senior Vice-President of the JSC "Russian Railways" dated April 7, 2017 No. 675r (in Russ.).

### ABOUT THE AUTHOR

**Leonid A. GERMAN,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Branch of FGBOU VO "SamGUPS" in Nizhny Novgorod

Received 21.01.2021

Accepted 15.02.2021

**For citation:** German L. A. Increasing railway capacity with the installation of reactive power compensation // VNIIZHT Scientific Journal. 2021. 80 (1): 35–44 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-1-35-44>.