

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.332:621.316.728

DOI 10.46960/2658-6754_2023_3_84

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ
СТАТИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА РЕАКТИВНОЙ
МОЩНОСТИ НА ПОСТУ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ
ТЯГОВОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ****Л.А. Герман**e-mail: lagerman@mail.ru

Филиал Самарского государственного университета путей сообщения
в Нижнем Новгороде
Нижний Новгород, Россия

К.В. Галкинe-mail: nexti83@mail.ru

Красноуфимская ДЭС Горьковской ДЭО Трансэнерго ОАО «РЖД»
Красноуфимск, Россия

Раскрыта необходимость и возможность на каждом конкретном участке железной дороги снижать принятый уровень стабилизации напряжения с 27...28 кВ на 26...27 кВ. Актуальность работы определяется тем, что на посту секционирования контактной сети переменного тока железных дорог устанавливают статические генераторы реактивной мощности (СГРМ), получившие названия СТАТКОМ (статические синхронные компенсаторы), повышающие пропускную способность межподстанционных зон. Существующая автоматика регулирования мощности СГРМ в зависимости от тяговой нагрузки обеспечивает генерирование емкостной мощности для стабилизации напряжения на постах секционирования на уровне 27...28 кВ. Эксперименты показали, что, наряду с успешным повышением уровня напряжения в контактной сети и соответствующим повышением пропускной способности, СГРМ имеет ряд недостатков: значительное превышение установленной мощности в сравнении с потребляемой мощностью тяговой нагрузки, что значительно повышает стоимость установки; значительные потери мощности непосредственно в СГРМ с учетом дополнительного расхода энергии на охлаждение силовых транзисторов. Предлагаемое мероприятие практически не изменит принятую повышенную пропускную способность, но снизит потери мощности в СГРМ на 30 %, что доказано при реализации описанного предложения на действующем участке тяговой сети.

Ключевые слова: контактная сеть, пост секционирования, стабилизация напряжения, статический генератор реактивной мощности, СТАТКОМ, тяговая сеть, фильтрокомпенсирующая установка.

Для цитирования: Герман Л.А., Галкин К.В. Техничко-экономические показатели статического генератора реактивной мощности на посту секционирования тяговой сети железной дороги // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 3. С. 84-100. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_3_84

TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF STATIC VAR GENERATOR AT RAILWAY TRACTION NETWORKS SECTIONING POST

L.A. German

e-mail: lagerman@mail.ru

The Branch of the Samara State Transport University in Nizhny Novgorod
Nizhny Novgorod, Russia

K.V. Galkin

e-mail: nexti83@mail.ru

Krasnoufimsk power supply distance of the Gorky Directorate for Energy Supply
– a structural subdivision of Transenergo – a branch of the JSCo «RZD»
Krasnoufimsk, Russia

Abstract. Static var generators (SVG), called static synchronous compensators (STATCOM) are installed at the sectioning post of the railway AC contact network to increase the throughput of inter-substation zones. The existing SVG automatic power control provides the generation of reactive power depending on the traction load to stabilize the voltage at the sectioning posts at the level of 27 ... 28 kV. The results of experiments have shown that, along with a successful increase in the voltage level in the contact network and a corresponding increase in the throughput, the SVG has a number of disadvantages: a significant excess of the SVG installed power in comparison with the power consumption of the traction load, which significantly increases the cost of the installation; significant power losses directly in the SVG, taking into account the additional energy consumption for cooling power transistors. The paper shows the necessity and possibility to reduce the accepted level of voltage stabilization from 27...28 kV to 26...27 kV in each particular section. Proposed decision will practically not change the accepted increased capacity, but will reduce SVG power losses by 30%, which was proved during the implementation of this proposal on the existing section of the traction network.

Keywords: contact network, sectioning post, voltage stabilization, static var generator, STATCOM, traction network, filter compensating unit.

For citation: L.A. German and K.V. Galkin, “Technical and economic indicators of static var generator at railway traction networks sectioning post”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 84-100, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_3_84

1. Введение

Статические синхронные компенсаторы (СТАТКОМ) решают проблему качества электроэнергии в электрических сетях и широко используются в электроэнергетических системах с нелинейной нагрузкой: в нефтехимической и металлургической отраслях, на железнодорожном транспорте и т.д. Они имеют множество преимуществ по сравнению с аналогичными устройствами (например, конденсаторными батареями) [1].

Для повышения пропускной способности железных дорог переменного тока в последние годы стали применять статические генераторы реактивной мощности (СГРМ) на базе силовых транзисторов *IGBT* на постах секционирования (ПС) контактной сети переменного тока мощностью 10...15 Мвар (рис. 1, а) [2].

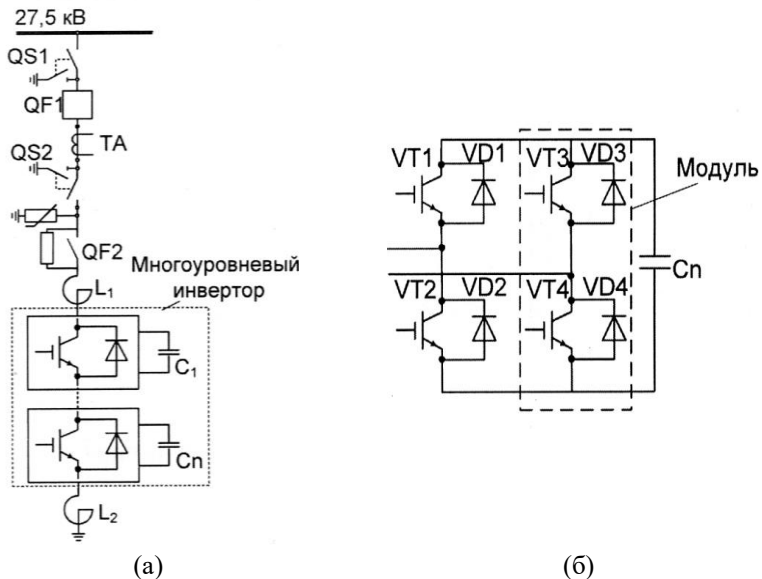


Рис. 1. Статический генератор реактивной мощности:
схема СТАТКОМ (а); принципиальная схема силовой ячейки (б)

Fig. 1. Static var generator:
STATCOM (a); power cell circuit diagram (b)

Опыт их эксплуатации и анализ замечаний по технико-экономическим характеристикам позволяет определить пути дальнейшего совершенствования СГРМ, что определяя актуальность представленной работы.

II. Характеристика СГРМ

Для исследования показателей СГРМ в эксплуатационных условиях выбран пост секционирования *Черная речка* межподстанционной зоны *Красноуфимск-Чад* Горьковской железной дороги (ГЖД) номинальной мощностью установки по первой гармонике 15 Мвар. Активная мощность тяговой нагрузки участка *Красноуфимск-Чад* составляет 9,37 МВт, а реактивная – 7,5 Мвар. На участке 48 пар поездов, из них до 20 % – тяжеловесные и сдвоенные поезда. Как указано в [3], 30 % мощности (т.е. 5 Мвар) используется для формирования активных фильтров, а основная мощность СГРМ (т.е. 10 Мвар) – для компенсации реактивной мощности тяговой нагрузки.

Основное предназначение СГРМ заключается в компенсации реактивного тока тяговой нагрузки, снижении колебаний напряжения в тяговой сети и повышении пропускной способности железной дороги. СГРМ выполнен по схеме преобразователя напряжения на основе биполярных *IGBT*-транзисторов с изолированным затвором [1, 3]. В соответствии с техническим заданием, СГРМ подавляет высшие гармонические составляющие 150, 250, 350, 450, 550 Гц. В результате кривая напряжения на шинах ПС приближается к синусоиде 50 Гц, а в токе СГРМ четко прослеживается гармоника 150 Гц (рис. 2).

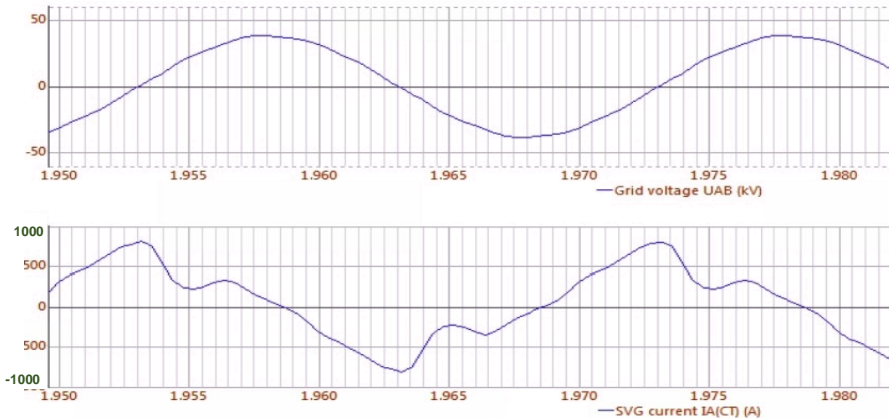


Рис. 2. Напряжение на шинах ПС, кВ; ток СГРМ, А

Fig. 2. Voltage on the buses of the sectioning post, kV; SVG current, A

Подключение к рельсам двухпутного участка осуществляется через дроссель-трансформатор ДТ к его средней точке. Для секционирования контактной сети установлены продольные разъединители РЛНД-16-35/1000. Собственные нужды ПС обеспечивает трансформатор ТМЖ-27,5/25, подключенный к линии ДПР-27,5кВ. Для снижения помех на связь к СГРМ подключен конденсаторный фильтр БР.

Межподстанционная зона *Красноуфимск-Чад* характеризуется сложным профилем по четному и нечетному пути с подъемами до 17 промилей, тремя туннелями по 1-му пути (рис. 4), у каждого участка указаны подъемы в промилях. Для исследований специально подключен счетчик электроэнергии к вводному трансформатору тока ТОЛ-35-600/5 и трансформатору напряжения ТН 27,5 кВ шин ПС.

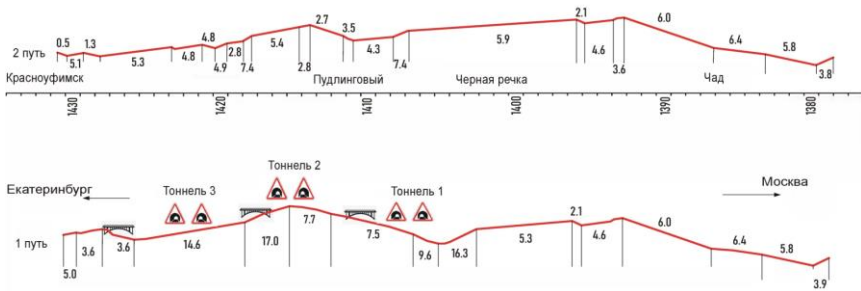


Рис. 4. Профиль межподстанционной зоны *Красноуфимск-Чад*

Fig. 4. Profile of intersubstation zone *Krasnoufimsk-Chad*

III. Анализ генерации реактивной мощности СГРМ

Регулирование СГРМ по проекту реализовано по закону «регулирование напряжения», при этом установлен уровень стабилизации напряжения (принято 27,5 кВ) и генерируемый ток СГРМ определяется этим напряжением. Если напряжение превышает 27,5 кВ, то генерируемый ток переключается с емкостного на индуктивный. Представленный суточный график реактивной мощности СГРМ ПС *Черная речка* (рис. 5) показывает необходимость в реактивной мощности на межподстанционной зоне для стабилизации напряжения на посту секционирования.

Генерируемая мощность изменяется в пределах 1,09-4,83 Мвар при среднем значении 3,28 Мвар. За три года эксплуатации СГРМ не было ни одного случая пониженного напряжения на рассматриваемом участке. Как указано в [4], приближенное значение мощности нерегулируемой установки поперечной емкостной компенсации для поста секционирования для максимального снижения потерь мощности составило бы $7,5/2 = 3,75$ Мвар.



Рис. 5. Генерируемая мощность СГРМ

Fig. 5. SVG generated power

Можно сделать вывод, что спроектированная мощность 15 Мвар, из которых 10 Мвар необходимы для компенсации реактивной мощности, существенно завышена для указанного участка. В настоящий момент отсутствуют документы, регламентирующие расчет реактивной мощности СГРМ. Формула расчета реактивной мощности в системе тягового электрооборудования из нормативных документов предназначена для расчета традиционных конденсаторных установок (КУ) с последовательным соединением батареи конденсаторов и реактора [5], так как в ней учитывается снижение мощности КУ при снижении напряжения в тяговой сети. Однако на участке рабочей характеристики СГРМ напряжение стабильное на уровне заданной уставки (по опыту работы СГРМ на отечественных ж.д. обычно принято $U_{уст} = 27...28$ кВ).

Повышенное напряжение устанавливают на уровне $U_{ст} = 27...28$ кВ для решения приоритетной задачи – увеличения скорости движения тяжелых поездов (когда вес поезда повышается от принятого 7100 т до 12000 т и выше). Однако при этом увеличивается потребление реактивной мощности электроподвижного состава (ЭПС) (при переходе от номинального напряжения на токоприемнике до 28 кВ рост реактивной мощности на 25 %), увеличивается перекомпенсация реактивной мощности в тяговой сети, что ведет к повышенным потерям электроэнергии. Следует учитывать, что режим повышенного напряжения $U_{ст}$ на СГРМ в течение суток постоянный (как это принято в настоящее время), а длительность режима повышенных нагрузок (выше средних), например, по рис. 5 – около половины суток.

Этот пример свидетельствует о необходимости корректировки принятого закона стабилизации напряжения или выбора другого закона регулирования мощности СГРМ на посту секционирования.

IV. Исследования потерь мощности в СГРМ

Потери электроэнергии в КУ не превышают 0,002-0,0025 кВт/квар [6]. Однако в статических тиристорных компенсаторах и в СТАТКОМ, предназначенных для работы в регулируемых режимах для снижения гармоник, колебаний и провалов напряжения в сетях с резкопеременными нагрузками, потери мощности значительно больше и составляют 1...3 % от номинальной мощности установок компенсации [6]. Общие потери мощности в СТАТКОМ складываются из потерь во входном и в выходном реакторах $L1$, $L2$, а также в многоуровневом инверторе, состоящем из 64 последовательно соединенных силовых ячеек. Каждая силовая ячейка включает в себя два *IGBT* модуля (рис. 1, б), состоящие из двух последовательно соединенных *IGBT* транзисторов.

Впервые исследования потерь мощности в СГРМ в тяговой сети были выполнены в [7, 8], где показано, что потери мощности сопоставимы с составляющей экономии энергии, получаемой за счет регулирования установки компенсации. Это значит, что отсутствует эффект регулирования при учете экономии потерь мощности, а значит эффект СГРМ по потерям мощности следует считать только по составляющей экономии электроэнергии от среднего значения генерируемой реактивной мощности, как для нерегулируемой установки.

Суммарное снижение потерь мощности в тяговой сети при включении СГРМ равно [9]:

$$\delta P = \delta P_{\text{нер}} + \delta P_{\text{рег}}, \quad (1)$$

где $\delta P_{\text{нер}}$ – снижение потерь мощности при учете среднего значения тока СГРМ, то есть, считая СГРМ нерегулируемой; $\delta P_{\text{рег}}$ – дополнительное снижение потерь мощности при учете изменения тока СГРМ в зависимости от изменения тока тяговой нагрузки, то есть при учете регулируемого эффекта СГРМ.

Поскольку потери в СГРМ сопоставимы со значением $\delta P_{\text{рег}}$, предлагается при расчете потерь мощности в тяговой сети принимать расчеты с СГРМ, как с нерегулируемой установкой с эффектом снижения потерь мощности $\delta P_{\text{нер}}$. На рассматриваемой установке на ПС *Черная речка* для подтверждения данных по реальным потерям мощности в СГРМ выполнены исследования потерь активной мощности в различных режимах. Изучаемые потери электроэнергии состоят из двух частей: потери электроэнергии

непосредственно в СГРМ ΔP_1 , обусловленные процессом коммутации в биполярных *IGBT*-транзисторов (*SVG*) и потерями в реакторах $L1$ и $L2$ и потерями электроэнергии ΔP_2 собственных нужд СГРМ на вентиляцию транзисторов.

Для определения потерь в СГРМ, как было сказано, специально дополнительно смонтирован учет на счетчике, который за сутки показал активные потери $\Delta P_1 = 37,1$ кВт (рис. 6, а), а измеренные потери на собственные нужды $\Delta P_2 = 15$ кВт.

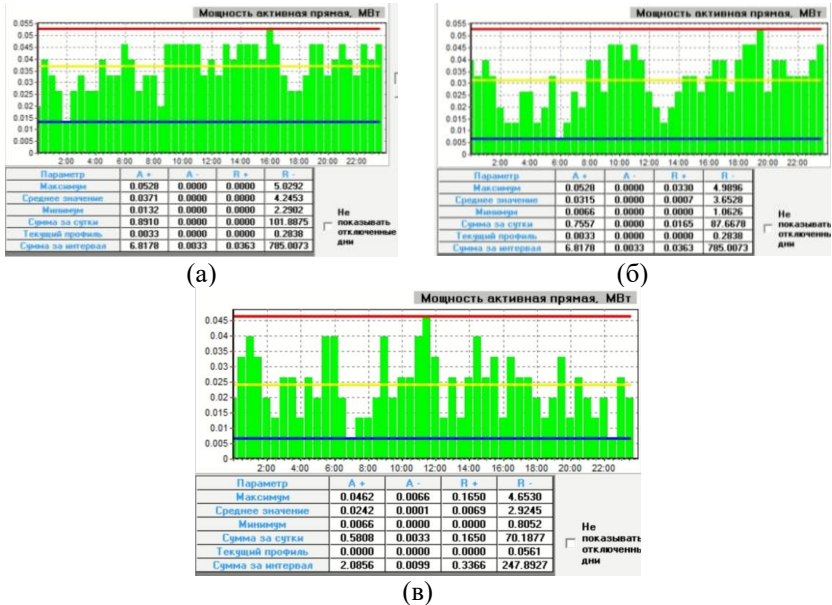


Рис. 6. Активные потери мощности в СГРМ за сутки при стабилизации: на 27,5 кВ (а); на 27 кВ (б); на 26,5 кВ (в)

Fig. 6. SVG active power losses per day with stabilization at: 27.5 kV (a); 27 kV (б); 26.5 kV (в)

Таким образом, суммарные потери составят $\Delta P = 52,1$ кВт. Учитывая среднюю генерируемую мощность СГРМ 3,2 Мвар, реальные средние активные потери составят $\Delta P \% = 52,1 \cdot 100 / 3200 = 1,63$ %. При изменении напряжения стабилизации на 27 кВ (рис. 6, б) потери в СГРМ составят 37,1 кВт, а при стабилизации на уровне 26,5 кВ (рис. 6, в) потери снижаются до 24,2 кВт. Это значит, что при изменении напряжения стабилизации на шинах ПС с 27,5 кВ до 26,5 кВ мощность активных потерь энергии снижа-

ется на $37,1 - 24,2 = 12,9$ кВт. Кроме того, при снижении напряжения стабилизации на ПС до 26,5 кВ снижаются потребляемая реактивная мощность ЭПС и снижается зона перекомпенсации реактивной мощности, что также ведет к экономии электроэнергии.

V. Оценка снижения потерь активной мощности СГРМ при изменении уровня стабилизации напряжения на ПС

На ПС в общем случае действуют два тока: ток тяговой сети, «отнесенный к ПС», и ток СГРМ. Будем рассматривать активно-индуктивный ток тяговой сети. Напряжение на ПС:

$$U_{\text{ПС}} = U_{\text{ТП}} - \left[(I''_{\text{ТС}} - I_{\text{СГРМ}}) \cdot X_{\text{вх}} + I'_{\text{ТС}} \cdot R_{\text{вх}} \right], \quad (2)$$

где $X_{\text{вх}}$ и $R_{\text{вх}}$ – входное индуктивное и активное сопротивления ПС, обычно при нормальной работе межподстанционной зоны с двухсторонним питанием $X_{\text{вх}} = 6 \dots 8$ Ом; $I''_{\text{ТС}}$, $I'_{\text{ТС}}$ – индуктивный и активный токи тяговой сети, «отнесенные к ПС».

Ток СГРМ зависит от напряжения стабилизации $U_{\text{ст}}$. Специально проведенный эксперимент на ПС Черная речка показал следующее: при изменении $U_{\text{ст}}$ с 27 до 26,5 кВ за период времени в 10 мин ток СГРМ изменился с 250...300 А до 120...170 А (рис. 7).



Рис. 7. Напряжение стабилизации СГРМ, кВ (а); ток СГРМ, А (б): ось абсцисс – время в час: мин: сек.

Fig. 7. SVG stabilization voltage, kV (a); SVG current, A (b): X axis – time per hour: min: sec.

Для оценки изменения тока СГРМ при изменении напряжения стабилизации проведен более широкий эксперимент, этапы которого описаны далее.

Первый этап. При существующем напряжении стабилизации 27,5 кВ в течение суток выполнены измерения напряжения на шинах ПС Черная речка и ток СГРМ (рис. 8, а).

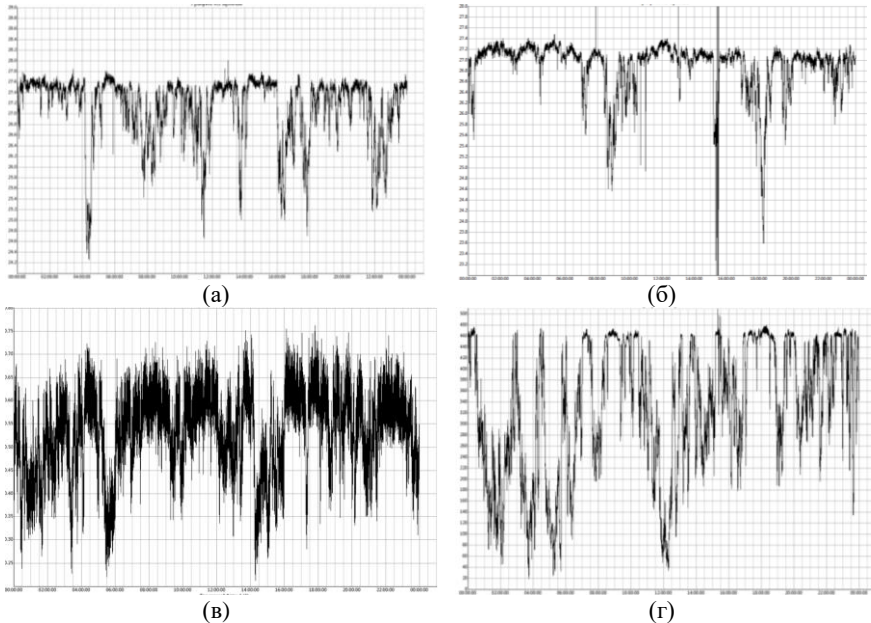


Рис. 8. Стабилизация напряжения на ПС на уровне 27,5 кВ (а) и 27 кВ (б); ток СГРМ в кА за сутки при стабилизации напряжения на уровне 27,5 кВ (в) и в А при стабилизации напряжения на уровне 27 кВ (г)

Fig. 8. Voltage stabilization at the sectioning post at the level of 27.5 kV (а) and 27 kV (б); SVG current in kA per day with voltage stabilization at the level of 27.5 kV (в) and in A with voltage stabilization at the level of 27 kV (г)

В этом случае напряжение на шинах ПС изменялось в пределах 27,4...27,6 кВ. Ток СГРМ (рис. 8, в) изменяется в пределах 250-730 А при среднем значении около 550 А.

Второй этап. Напряжение стабилизации было снижено до 27 кВ (рис. 8, б), и проведены измерения в течение суток. Напряжение на шинах ПС изменялось в пределах 27,0...27,3 кВ. Ток СГРМ (рис. 8, г) изменяется в пределах 60...470 А при среднем значении около 420 А. Если считать, что на втором этапе по сравнению с первым ток уменьшился в 1,3 раза ($550/420$), потери активной мощности снизились в $(1,3)^2 = 1,69$ раза.

Ток СГРМ непосредственно влияет на потери активной мощности СГРМ. Следовательно, необходимо ответственно подходить к выбору уровня стабилизации напряжения СГРМ. Чем выше напряжение стабилизации (сейчас принято 27-28 кВ), тем легче осуществлять движение тяжеловесным и двоярным поездам. Однако авторы статьи уверены, что уровень стабилизации нужно корректировать в зависимости от конкретных местных условий межподстанционной зоны. Уже сейчас можно уменьшить уровни стабилизации на некоторых участках ГЖД, например, с 27...28 кВ до 26...27 кВ. Хотя вполне вероятно, что с увеличением размеров тяжеловесного движения в скором времени придется изменять (повышать) уровень стабилизации.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о целесообразности введения автоматики переключения уровня стабилизации напряжения в зависимости от тяговой нагрузки.

VI. Помехи преобразователя на железнодорожную связь

С момента включения первых установок СГРМ [8] на Западно-Сибирской железной дороге были отмечены помехи на поездную связь. Они проявлялись в том, что при приближении локомотива примерно за два километра до поста секционирования с СГРМ усиливались помехи на поездную связь машиниста локомотива. На рис. 9 представлен график радиоконтроля максимального уровня помехового воздействия на частоте 2,13 МГц вблизи ПС *Черная речка*.

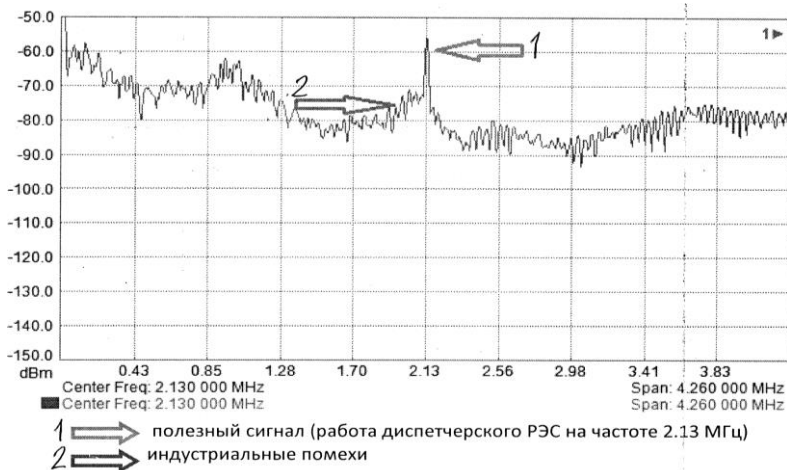


Рис. 9. Помехи СГРМ на поездную связь. Спектрограммы излучений

Fig. 9. SVG interference on train communication. Spectrum analyzer data

В период проведения совместных с представителем ОАО «РЖД» технических мероприятий по радиоконтролю максимальный уровень помехового воздействия на частоте 2,13 МГц наблюдался вблизи устройства стабилизации напряжения поста секционирования (СГРМ) контактной сети 27,5 кВ 1404 км структурного подразделения Красноуфимской дистанции энергоснабжения ЭЧ-10 Горьковской дирекции по энергообеспечению филиала ОАО «РЖД» («Трансэнерго»).

Установленный конденсаторный фильтр БР на СГРМ не улучшил ситуацию. В настоящее время ведется модернизация указанного фильтра. При увеличении мощности конденсаторов фильтра значительно снизилась мощность помех.

VIII. Предложения по повышению эффективности СГРМ

Сегодня отсутствует утвержденная методика расчета мощности СГРМ для повышения пропускной способности железных дорог. Анализ работы существующих СГРМ на электрифицированных жд указывает на их завышенные мощности. Необходимо разработать методику расчета мощности СГРМ.

Недостатками СГРМ, как было отмечено, являются высокая стоимость оборудования и значительные потери электроэнергии в *IGBT*-транзисторах. Отвести такие потери из преобразователя при помощи воздушного охлаждения затруднительно, необходимо использовать системы с жидким теплоносителем, сложные в производстве и эксплуатации. Указанное заставляет искать пути их устранения. СГРМ способен генерировать реактивную мощность как емкостного, так и индуктивного характера (рис. 10).

Эта особенность использована в предлагаемом техническом решении комбинированной фильтрокомпенсирующей установки (КФКУ) [10]:

1) уменьшена существующая мощность СГРМ за счет использования типовой нерегулируемой фильтрокомпенсирующей установки (ФКУ);

2) за счет способности генерировать индуктивную составляющую стало возможным, включив параллельно СГРМ, регулировать мощность нерегулируемой ФКУ $Q_{\text{пер}}$, необходимая реактивная мощность сверх $Q_{\text{пер}}$ устанавливается в СГРМ;

3) уменьшение существующей мощности СГРМ выполняется за счет введения нерегулируемой ФКУ, а также за счет передачи функции снижения гармоникотка от СГРМ к нерегулируемой ФКУ.

Известно, что режим активного фильтра СГРМ фильтрации гармоник требует увеличения мощности СГРМ на 30 %. Таким образом, мощность СГРМ уменьшается на мощность нерегулируемой ФКУ $Q_{\text{пер}}$ и еще на 30 %. В итоге, для заданной мощности регулируемой компенсации $Q_{\text{зад}}$, мощность СГРМ в КФКУ:

$$Q_{\text{СГРМ}} = (Q_{\text{зад}} - 0,3Q_{\text{зад}}) / 2. \quad (3)$$

Здесь принято, что мощности ФКУ и СГРМ равны. Тогда на основании (3) мощность КФКУ равна $Q_{\text{СГРМ}} = 0,35 Q_{\text{зад}}$. Это означает, что мощность существующей СГРМ уменьшается в три раза, соответственно уменьшаются стоимость и потери мощности.

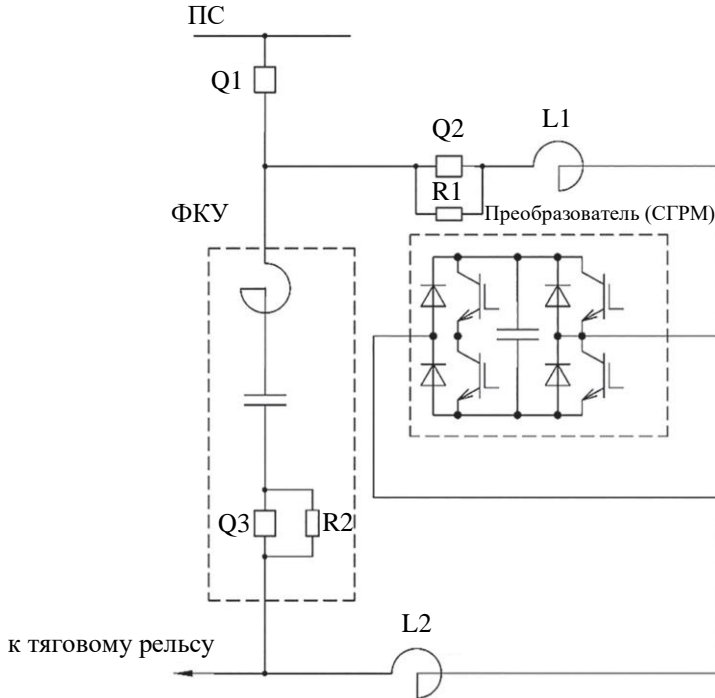


Рис. 10. Комбинированная фильтрокомпенсирующая установка

Fig. 10. Combined filter compensating unit

VIII. Выводы

Анализ работы СГРМ в тяговой сети отечественных железных дорог доказал эффективность их работы в повышении пропускной способности. В настоящее время следует сосредоточить внимание на снижении активных потерь электроэнергии в СГРМ и снижении ее стоимости.

Исследования проектной мощности СГРМ на ПС Черная речка показали, что в течение суток генерируемая мощность изменяется в пределах 1,1...4,8 Мвар (при реактивной мощности участка – 7,5 Мвар), что значительно меньше проектного значения 15 Мвар. За прошедшие 3 года работы СГРМ на рассматриваемом участке не было ни одного случая пониженного

напряжения в межподстанционной зоне. Следует указать на необходимость разработки методики расчета мощности СГРМ для тяговых сетей железных дорог, учитывающей мощность тяговой нагрузки участка и требования повышения пропускной способности.

Экспериментальные исследования потерь мощности СГРМ на посту секционирования *Черная речка* ГЖД показали, что они составляют 1,63 % от средней генерируемой мощности СГРМ (3,2 Мвар), что соответствует потерям в 37,1 кВт, при этом следует прибавить потери собственных нужд СГРМ на вентиляцию транзисторов – 15 кВт и в сумме потери мощности в СГРМ получатся 52,1 кВт.

В настоящее время принято напряжение стабилизации на шинах ПС с СГРМ на уровне 27...28 кВ, однако доказательных пояснений по этому поводу не существует. Выбор повышенного напряжения стабилизации на уровне $U_{ст} = 27...28$ кВ необходим для решения приоритетной задачи – увеличения скорости движения тяжеловесных поездов (когда вес поезда повышается от принятого 7100 т до 12000 т и выше). Однако при этом увеличивается потребление реактивной мощности ЭПС и увеличивается перекompенсация реактивной мощности в тяговой сети, что ведет к повышенным потерям электроэнергии. Авторы считают, что в конкретных условиях межподстанционных зон возможна корректировка указанного уровня стабилизации напряжения на шинах ПС с его снижением с 27...28 кВ до 26...27 кВ. Проведенные эксперименты подтвердили снижение активных потерь мощности СГРМ с 37,1 до 24,2 кВт, то есть на 35 % при снижении уровня стабилизации напряжения на ПС. При этом пропускная способность исследуемого участка не изменилась.

Целесообразна разработка автоматики СГРМ с переключением уровня стабилизации напряжения на ПС с повышенного значения при больших тяговых нагрузках на пониженный уровень стабилизации при пониженных значениях нагрузки. Кроме того, перспективен вариант предложенной в [10] КФКУ.

© Герман Л.А., 2023

© Галкин К.В., 2023

Поступила в редакцию 02.06.2023

Принята к публикации 16.06.2023

Received 02.06.2023

Accepted 16.06.2023

Библиографический список

- [1] Кочкин В.И. Статические компенсаторы реактивной мощности для электрических сетей. М.: Элекс-КМ, 2010. – 296 с.
- [2] Распоряжение ОАО «РЖД» № 2537р от 14.12.2016 г. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года.
- [3] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. М.: ФГБУ ДПО «УМЦ ЖДТ», 2022. – 264 с.
- [4] Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог. М.: ФГБУ ДПО «УМЦ ЖДТ», 2015. – 316 с.
- [5] Кондратьев Ю.В., Тарасенко А.В., Комяков А.А., Незевак В.Л., Терехин И.А. Методика выбора мест размещения и мощности устройств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности в системе тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. Промежуточный отчет о НИР. 2098. Омск: ОмГУПС, 2015. – 72 с.
- [6] Вагин Г.Я., Куликов А.Л., Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н. Системы электроснабжения. Н. Новгород: НГТУ, 2019. – 462 с.
- [7] Никонов А.В. Улучшение эксплуатационных показателей системы тягового электроснабжения за счет совершенствования работы регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности: дис. канд. техн. наук, ОмГУПС, Омск, 2019. – 124 с.
- [8] Никонов А.В. Потери мощности в основном оборудовании и энергопотреблении собственных нужд СТАТКОМ // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте, Февраль 8, 2018, Омск, Россия: ОмГУПС, 2018. С. 343-349.
- [9] Бородулин Б.М., Герман Л.А. Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
- [10] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Серебряков А.С., Гончаренко В.П., Карабанов А.А. Способ регулирования реактивной мощности тяговой сети, Пат. 2762932 RU, заявл. 25.06.21; опубл. 24.12.21. – Бюл. № 36.

References

- [1] V.I. Kochkin, *Sticheskie kompensatory reaktivnoj moshchnosti dlya elektricheskikh setej* [Static reactive power compensators for electrical networks]. Moscow: Eleks-KM, 2010 (in Russian).
- [2] Order of JSCo “RZD” No. 2537r dated Dec. 14, 2016. *Energeticheskaya strategiya holdinga «Rossijskie zheleznye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda* [Energy strategy of the Russian Railways company for the period up to 2020 and for the future up to 2030] (in Russian).
- [3] L.A. German, K.S. Subhanverdiev and V.L. German, *Avtomatizaciya elektrosnabzheniya tyagovoj seti peremennogo toka* [Automation of power supply of AC traction network]. Moscow: FSBE APE «EICRT», 2022 (in Russian).
- [4] L.A. German and A.S. Serebryakov, *Reguliruemye ustanovki emkostnoj kompensacii v sistemah tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznih dorog* [Adjustable capacitive

- compensation units in railway traction power supply systems*]. Moscow: FSBE APE «EICRT», 2015 (in Russian).
- [5] Yu.V. Kondratiev, A.V. Tarasenko, A.A. Komyakov, V.L. Nezevak and I.A. Terekhin, “*Metodika vybora mest razmeshcheniya i moshchnosti ustrojstv prodol'noj i poperechnoj kompensacii reaktivnoj moshchnosti v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznoj dorogi peremennogo toka [Methodology for choosing the location and power of devices for longitudinal and transverse reactive power compensation in the traction power supply system of the AC railway]*”, OmGUPS, Omsk, Russia, Tech. Rep. 2098, 2015 (in Russian).
- [6] G.Ya. Vagin, A.L. Kulikov, A.B. Loskutov and E.N. Sosnina, *Sistemy elektrosnabzheniya [Power supply systems]*. N. Novgorod: NNSTU, 2019 (in Russian).
- [7] A.V. Nikonov, “*Uluchshenie ekspluatacionnyh pokazatelej sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya za schet sovershenstvovaniya raboty reguliruemyyh ustrojstv poperechnoj kompensacii reaktivnoj moshchnosti [Improving the performance of the traction power supply system by improving the operation of adjustable devices for transverse reactive power compensation]*”, Cand. of Tech. S. thesis, OSTU, Omsk, Russia, 2019 (in Russian).
- [8] A.V. Nikonov, “Loss of power in basic equipment and power consumption of own needs STATCOM”, in proc. *Innovacionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte [Innovative Projects and Technologies in Education, Industry and Transport]*, Feb. 08, 2018, Omsk, Russia, pp. 343-349 (in Russian).
- [9] B.M. Borodulin, L.A. German and G.A. Nikolaev, *Kondensatornye ustanovki elektrificirovannyh zheleznyh dorog [Capacitor installations of electrified railways]*. Moscow: Transport, 1983 (in Russian).
- [10] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev, A.S. Serebryakov, V.P. Goncharenko and A.A. Karabanov, “*Method for regulating the reactive power of the traction network*”, Patent RU 2762932, Dec. 24, 2021.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Герман Леонид Абрамович, доктор технических наук, профессор филиала Самарского государственного университета путей сообщения в Нижнем Новгороде, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Галкин Константин Владимирович, главный инженер Красноуфимской ДЭС Горьковской ДЭО Трансэнерго ОАО «РЖД», г. Красноуфимск, Российская Федерация

Leonid A. German, D. Sci. (Eng.), professor of the Branch of the Samara State Transport University in Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Konstantin V. Galkin, chief engineer of the Krasnoufimsk power supply distance of the Gorky Directorate for Energy Supply – a structural subdivision of Transenergo – a branch of the JSCo «RZD», Krasnoufimsk, Russian Federation