



Столыпинский
вестник

Научная статья

Original article

УДК 62

**МЕТОДИКА ВЫБОРА КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ
В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО
ТОКА**

**METHOD OF SELECTION OF COMPENSATING DEVICES
IN THE SYSTEM OF TRACTION POWER SUPPLY OF ALTERNATING
CURRENT**

Юй Ихань, магистр, Российский университет транспорта (МИИТ), г.Москва

Yu Han, Master's Degree, Russian University of Transport (MIIT), Moscow

Аннотация: В работе рассматривается система тягового электроснабжения напряжением 27,5 кВ переменного тока. В программной среде MATLAB-Simulink разработана расчетная модель, учитывающая параметры системы внешнего электроснабжения, график движения поездов и токопотребление электротяговой нагрузки на межподстанционной зоне. Показано, что при выборе мощности компенсирующего устройства по среднему значению реактивной мощности, потребляемой одним поездом, прохождение его по межподстанционной зоне с постоянным значением потребляемого тока вызывает в проводах контактной сети такие же средние потери мощности, что и при отсутствии компенсирующего устройства. Увеличение числа поездов, одновременно находящихся на межподстанционной зоне при прежней

мощности компенсирующего устройства, влечет за собой снижение потерь мощности в проводах контактной сети относительно аналогичной ситуации без компенсирующего устройства, однако реактивная мощность при этом компенсируется лишь частично. В расчетах компенсирующих устройств предлагается учитывать реальный существующий график движения поездов, на основе вероятностной оценки которого определяется среднесуточная реактивная мощность, потребляемая электроподвижным составом. При этом необходимо учитывать потери мощности в контактной сети. Применение нерегулируемых компенсирующих устройств целесообразно на участках с постоянно присутствующей нагрузкой. При выборе ступенчатых устройств поперечной емкостной компенсации предложено рассчитывать их мощность на основании вероятностного анализа графика движения поездов и токопотребления на межподстанционной зоне. При вероятности появления определенного количества поездов, превышающей 50 %, наиболее эффективными оказываются компенсирующие устройства, мощность которых выбрана на основе среднестатистического потребления мощности всеми поездами без учета времени отсутствия нагрузки на межподстанционной зоне, а также двухступенчатые устройства, мощность первой ступени которых выбрана по токопотреблению двух наиболее вероятных случаев появления числа поездов.

Abstract: The paper considers a traction power supply system with a voltage of 27.5 kV AC. In the MATLAB-Simulink software environment, a calculation model has been developed that takes into account the parameters of the external power supply system, the train schedule and the current consumption of the electric traction load in the inter-substation zone. It is shown that when choosing the power of a compensating device based on the average value of the reactive power consumed by one train, its passage through the substation zone with a constant value of the current consumed causes the same average power losses in the wires of the contact network as in the absence of a compensating device. An increase in the number of trains simultaneously located in the substation zone at the same power of the compensating device entails a

decrease in power losses in the wires of the contact network relative to a similar situation without a compensating device, but the reactive power is only partially compensated. In the calculations of compensating devices, it is proposed to take into account the actual existing train schedule, based on a probabilistic assessment of which the average daily reactive power consumed by an electric rolling stock is determined. At the same time, it is necessary to take into account power losses in the contact network. The use of unregulated compensating devices is advisable in areas with a constantly present load. When choosing stepped devices of transverse capacitive compensation, it is proposed to calculate their power based on a probabilistic analysis of the train schedule and current consumption in the substation zone. With the probability of a certain number of trains exceeding 50%, the most effective are compensating devices, the power of which is selected based on the average power consumption of all trains without taking into account the time of absence of load in the inter-station zone, as well as two-stage devices, the power of the first stage of which is selected based on the current consumption of the two most likely cases of the number of trains.

Ключевые слова: тяговое электроснабжение, компенсация реактивной мощности, поперечная емкостная компенсация, выбор компенсирующих устройств, энергоэффективность.

Keywords: traction power supply, reactive power compensation, transverse capacitive compensation, selection of compensating devices, energy efficiency.

В настоящее время на полигоне железных дорог России применяются компенсирующие устройства, основной целью использования которых является повышение уровня и качества напряжения, а также снижение потребления реактивной мощности [1]. При этом существующая Методика выбора мест размещения и мощности средств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности [2] предполагает расчет мощности компенсирующих устройств, устанавливаемых на посту секционирования в системе тягового электроснабжения напряжением 27,5 кВ переменного тока

исходя из обеспечения минимального допустимого уровня напряжения на токоприемнике подвижного состава.

В качестве примера рассмотрим однопутный участок железной дороги, электрифицированного на переменном токе, длиной $L = 50$ км с компенсирующим устройством, расположенным в середине межподстанционной зоны [3 – 5]. Удельное активное сопротивление контактной подвески $r_0 = 0,1$ Ом/км. Примем, что поезда на данном участке потребляют ток постоянного значения $I_{п} = 100$ А с коэффициентом мощности $\cos \varphi = 0,8$, тогда $\sin \varphi = 0,6$. Исходя из условия, что емкость компенсирующего устройства выбрана по среднему индуктивному току поезда $I_{пи}$, получим ток компенсирующего устройства $I_{КУ} = I_{пи} = 60$ А, при этом активный ток поезда $I_{па} = 80$ А. На рисунке 1 представлена расчетная схема, иллюстрирующая токораспределение при прохождении одного поезда по рассматриваемой межподстанционной зоне.

По общепринятым формулам произведен расчет потерь мощности в проводах контактной сети, по результатам которого построены графики (рисунок 2) изменения потерь мощности в проводах контактной сети при прохождении одного поезда по межподстанционной зоне с компенсирующим устройством ($\Delta P_{КУ}$, кривая 1) и без него (ΔP_0 , кривая 2).

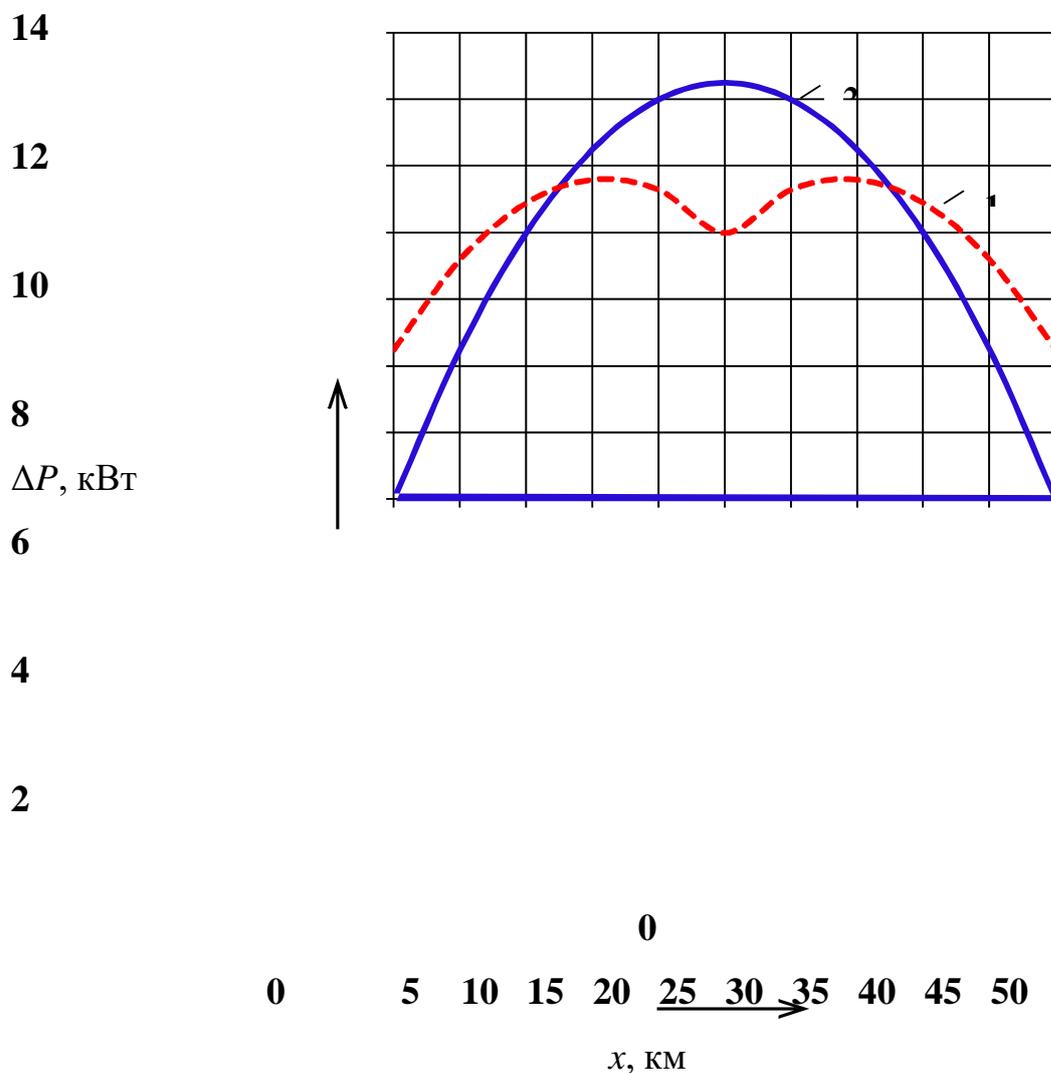


Рисунок 2 – Распределение потерь мощности в проводах контактной сети при прохождении по межподстанционной зоне одного поезда

Интегрирование полученных результатов приводит к следующим средним значениям потерь мощности в проводах контактной сети при прохождении по межподстанционной зоне одного поезда: при отсутствии компенсирующего устройства $\Delta P_0 \text{ ср}(1) = 8,33 \text{ кВт}$, при его наличии $\Delta P_{КУ} \text{ ср}(1) = 8,33 \text{ кВт}$. Таким образом, ввиду суммирования реактивных токов на

участке от поезда до компенсирующего устройства, а также значительного возрастания потерь мощности в случае установки компенсирующего устройства в начальный момент времени при появлении поезда на межподстанционной зоне эффект от применения компенсирующего устройства, мощность которого выбрана по средней реактивной мощности, потребляемой поездами, отсутствует.

Рассмотрим случай прохождения по рассматриваемому участку двух следующих друг за другом на расстоянии 5 км поездов при условии, что мощность компенсирующего устройства по-прежнему выбрана по среднему индуктивному току одного поезда. Графики изменения потерь мощности в проводах контактной сети при отсутствии компенсирующего устройства (ΔP_0) и наличии такового ($\Delta P_{КУ}$) представлены на рисунке 3 (кривые 2 и 1 соответственно).

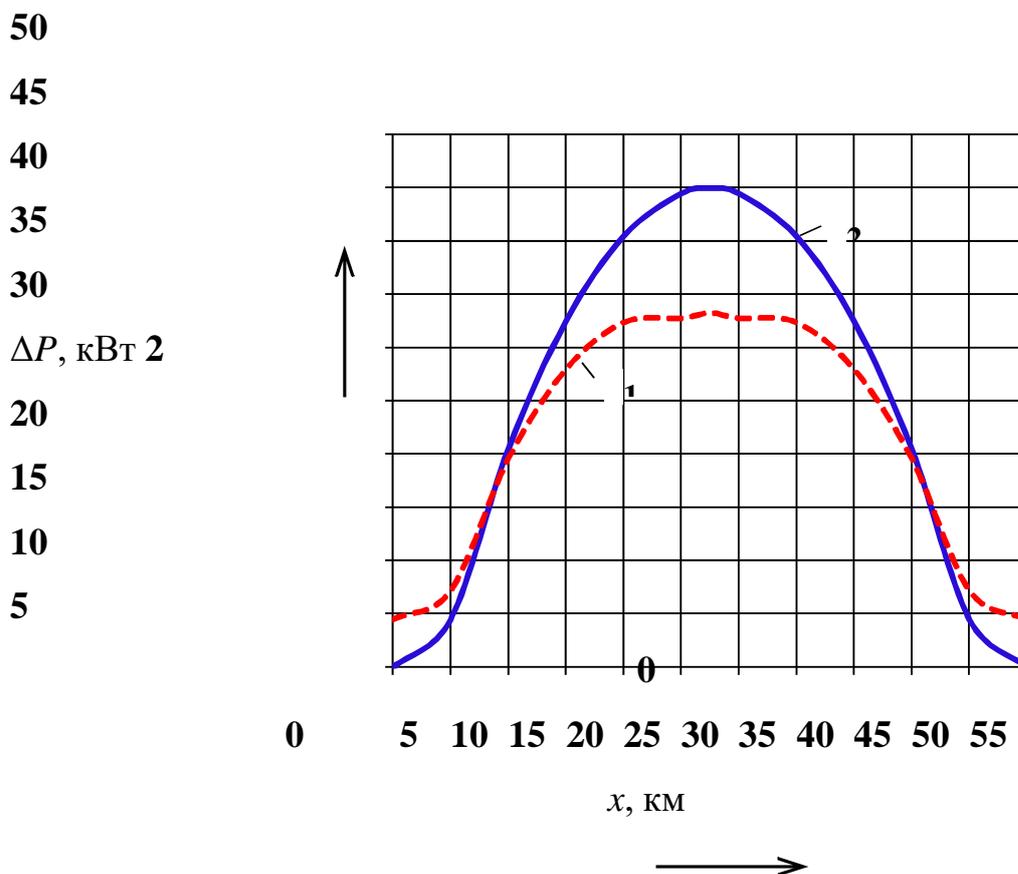


Рисунок 3 – Распределение потерь мощности в проводах контактной сети при

прохождении по межподстанционной зоне двух поездов

Средние значения потерь мощности в проводах контактной сети также определяются интегрированием функций этих потерь. Результаты интегрирования таковы: при наличии компенсирующего устройства $\Delta P_{КУ}$ $\text{ср}(2) = 21,07$ кВт, а при его отсутствии ΔP_0 $\text{ср}(2) = 26,61$ кВт.

То есть при прохождении по исследуемой межподстанционной зоне двух следующих друг за другом поездов установка компенсирующего устройства, мощность которого выбрана по среднему току одного поезда, вызывает положительный эффект, выражаемый в снижении средних потерь мощности в проводах контактной сети на 5,54 кВт по отношению к потерям, возникающим при отсутствии компенсирующего устройства в аналогичной ситуации [6, 7].

Рассмотрим участок между тяговыми подстанциями Медвежья Гора и Нигозеро Октябрьской железной дороги. Данный участок характеризуется сложным рельефом и имеет протяженность 94 км. На расстоянии 40 км от тяговой подстанции Нигозеро расположен пост секционирования Новый Поселок, на котором предлагается установка компенсирующего устройства.

Тяговые подстанции Нигозеро и Медвежья Гора питаются от энергосистемы по сети напряжением 220 кВ. Сопротивления системы до шин высшего напряжения тяговых подстанций представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сопротивления энергосистемы на шинах 220 кВ

Подстанция	Активное сопротивление, Ом	Реактивное сопротивление, Ом
Нигозеро	1,194	6,716
Медвежья Гора	3,939	22,493

На указанных тяговых подстанциях установлены силовые понижающие трансформаторы типа ТДТНЖУ-40000/220. Активное сопротивление трансформатора, приведенное к стороне 220 кВ, составляет 0,104 Ом, реактивное – 2,361 Ом. Типы контактной подвески и рельсов на участке с

указанием их удельных сопротивлений приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики тяговой сети

Координаты участка, км	Тип подвески и рельсов	Удельное активное сопротивление, Ом/км	Удельное реактивное сопротивление, Ом/км
0 – 12	ПБСМ-95 + МФ-100+2А-185+4Р65	0,093	0,240
13 – 21	М-95 + МФ-100 + 2А-185 + 4Р65	0,087	0,227
22 – 37	ПБСМ-95 + МФ-100+2А-185+4Р65	0,093	0,240
38 – 79	М-95 + МФ-100 + 2А-185 + 4Р65	0,087	0,227
80 – 84	ПБСМ-95 + МФ-100+2А-185+4Р65	0,093	0,240
85 – 94	М-95 + МФ-100 + 2А-185 + 4Р65	0,087	0,227

На рассматриваемом участке преобладает грузовое движение с электровозами серии 2ЭС5К и 3ЭС5К. Среднесуточный график движения поездов представлен на рисунке 4.

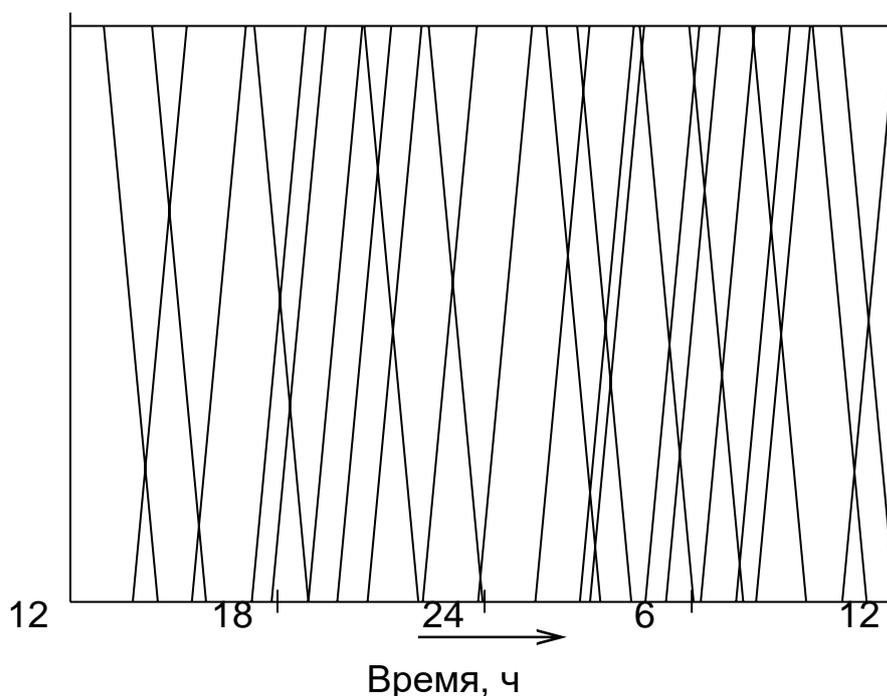


Рисунок 4 – Среднесуточный график движения поездов на рассматриваемом участке

График движения поездов на участке Нигозеро – Медвежья Гора характеризуется существенной неравномерностью. Следует отметить тот факт, что пропускная способность данного участка позволяет соблюдать интервал попутного следования не менее 19 мин. Это позволяет пропускать по участку более 70 пар поездов в сутки, что совершенно не соответствует реальным размерам движения и свидетельствует о необходимости применения в расчетах существующих участков имеющегося графика движения поездов, а не расчетного.

Токопотребление на участке Нигозеро – Медвежья Гора также характеризуется значительной неравномерностью, в связи с чем в расчетах с использованием MATLAB-Simulink применяется точное моделирование кривых токопотребления [8 – 10].

Минимальное трехминутное напряжение на токоприемнике подвижного состава при существующих размерах движения и отсутствии компенсирующего устройства составляет 18,53 кВ. Расчетная мощность нерегулируемого компенсирующего устройства на данном участке исходя из документа [2] составляет 13,37 Мвар. При этом среднесуточная реактивная мощность, потребляемая на рассматриваемом участке подвижным составом, равна 3,77 Мвар. Кроме того, максимально возможная мощность компенсирующего устройства по условию ограничения уровня напряжения до 29 кВ составляет лишь 2,26 Мвар.

Математическое ожидание мощности отключаемого нерегулируемого компенсирующего устройства исходя из средней реактивной мощности, потребляемой поездами, принимает значение 4,15 Мвар.

При выборе мощности первой ступени двухступенчатого компенсирующего устройства по средней реактивной мощности, потребляемой одним и двумя поездами, значение математического ожидания составляет 3,89 Мвар. Среднее значение суммарной реактивной мощности компенсирующего устройства при наличии на межподстанционной зоне трех поездов составляет 5,42 Мвар, отсюда мощность второй ступени – 1,53 Мвар.

Математическое ожидание мощности ступеней трехступенчатого компенсирующего устройства при наличии на межподстанционной зоне одного, двух и трех поездов составляет соответственно 2,38; 2,23 и 0,81 Мвар.

Результаты рассмотрения вариантов установки различных типов компенсирующих устройств сведены в таблицу 3 ($Q_{\text{ср}}$ – среднее значение потребляемой реактивной мощности на рассматриваемом участке; $U_{\text{мин}}$ – минимальное трехминутное значение напряжения на токоприемнике электроподвижного состава; $\Delta P_{\text{ср}}$ – средние потери мощности в проводах контактной сети).

Таблица 3 – Параметры системы тягового электроснабжения при установке различных типов компенсирующих устройств (КУ)

Параметры системы тягового электроснабжения (СТЭ)	КУ отсутствует	Нерегулируемое КУ 2,26 Мвар	Отключаемое КУ 4,15 Мвар	Двухступенчатое КУ 5,42 Мвар	Трехступенчатое КУ 5,42 Мвар
$Q_{ср}$, Мвар	3,77	3,30	3,13	3,10	3,02
U_{min} , кВ	18,53	20,60	21,58	21,94	22,86
$\Delta P_{ср}$, кВт	27,61	27,54	35,64	35,46	41,40

Следует отметить, что применение нерегулируемого компенсирующего устройства, не оборудованного системой автоматического включения и отключения в зависимости от наличия поездов, ограничивает ряд факторов.

В связи со сравнительно низкой допустимой мощностью компенсирующего устройства из-за значительного повышения уровня напряжения в контактной сети эффект от применения таких устройств также ограничен. При этом при отсутствии поездов в тяговой сети продолжают протекать емкостные токи, вызывающие потери мощности, которые в лучшем случае не изменяются, а в худшем – увеличиваются.

Тем не менее применение выбранного устройства, мощность которого в 1,7 раза меньше средней реактивной мощности, потребляемой поездами, привело к снижению потребляемой реактивной мощности на 12,6 %, а вследствие низкой мощности выбранного устройства потери в контактной сети не изменились из-за малых токов, протекающих в тяговой сети при отсутствии поездов.

Применение одноступенчатого нерегулируемого компенсирующего устройства с возможностью автоматического включения и отключения в зависимости от наличия поездов позволяет выбрать его мощность в полном

соответствии с реактивной мощностью, потребляемой электро тяговой нагрузкой при наличии на межподстанционной зоне одного, двух или трех поездов. Уровень напряжения в контактной сети при этом остается в допустимых пределах.

В случае применения такого устройства наблюдается снижение потребления реактивной мощности на 17,1 %, однако потери мощности в контактной сети возрастают при этом на 29 %. При установке двухступенчатого компенсирующего устройства, мощность которого выбрана в соответствии со статистически наиболее вероятной мощностью, потребляемой нагрузкой при нахождении на межподстанционной зоне одного или двух поездов, а также с мощностью дополнительной ступени, подобранной по потреблению трех поездов, потребление реактивной мощности сокращается на 17,8 %, а потери мощности в тяговой сети увеличиваются на 28,4 %, что по-прежнему составляет 0,1 % от общего потребления активной мощности. Напряжение на токоприемнике подвижного состава остается в пределах 21 – 29 кВ.

В случае же установки трехступенчатого компенсирующего устройства, мощность ступеней которого выбрана по реактивной мощности, потребляемой одним, двумя и тремя поездами соответственно, сокращение потребления реактивной мощности составляет 19,9 %, при этом потери мощности вследствие высокой мощности компенсирующего устройства при неравномерном токопотреблении тремя поездами увеличиваются на 49,9 %, что составляет уже 0,3 % от общего потребления активной мощности. По той же причине уровень напряжения на токоприемнике электроподвижного состава также неоднократно превышает допустимые значения. На основании проведенных исследований предлагается дополнить существующую методику [2] и проводить выбор и расчет компенсирующих устройств в следующем порядке.

1. Создание расчетной модели системы.
2. Построение среднесуточного графика движения поездов.
3. Выполнение тяговых расчетов.

4. Статистическая обработка графика движения поездов.

5. Выбор мощности рассматриваемых типов компенсирующих устройств на основе определения необходимости повышения уровня напряжения и изменения потерь мощности в контактной сети.

6. Анализ параметров системы тягового электроснабжения после установки компенсирующих устройств.

7. Оценка эффекта от установки выбранных типов компенсирующих устройств.

Выводы по результатам проведенных исследований в качестве дополнения к существующей методике расчета компенсирующих устройств могут быть сформулированы следующим образом.

1. На рассмотренном участке наиболее целесообразным является применение одно- и двухступенчатых компенсирующих устройств, ступени которых автоматически вводятся и выводятся из работы в зависимости от электротяговой нагрузки.

2. Выбор мощности компенсирующих устройств, устанавливаемых на межподстанционной зоне, по среднему току одного поезда не может являться обоснованным без расчета потерь мощности в проводах контактной сети ввиду того, что данные потери увеличиваются с установкой компенсирующих устройств, особенно если поезда ходят достаточно редко и межподстанционная зона регулярно остается без тяговой нагрузки. Вместе с тем при интенсивном движении поездов такой выбор мощности компенсирующего устройства приводит к уменьшению потерь в контактной подвеске, однако снижается эффект уменьшения потребления на железных дорогах переменного тока реактивной мощности.

3. Мощность компенсирующих устройств для существующих участков предлагается рассчитывать, используя имеющийся реальный график движения поездов, а не расчетный, с применением вероятностного анализа и учетом токопотребления.

4. При оценке технико-экономического эффекта от применения компенсирующих устройств следует учитывать потери мощности в контактной

сети и определять функцию оптимума между повышением уровня напряжения и ростом потерь мощности.

Литература:

1. Герман, Л. А. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог / Л. А. Герман, А. С. Серебряков. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015. – 316 с. – Текст : непосредственный.
2. СТО РЖД 07.022.2–2015. Система тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. Методика выбора мест размещения и мощности средств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности // consultant.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=646626#eiD3RnSYLxEu7Jti> (дата обращения: 28.10.2021).
3. Agunov A. V., Varentsov V. M., Marikin A. N., Sokolov D. A. Calculation of Power Losses in a DC Traction Power-Supply System with Allowance for Train Traffic, *Russian Electrical Engineering*, 2020, no. 91 (10), pp. 617 – 619.
4. Расчеты потерь мощности в системе тягового электроснабжения постоянного тока с учетом движения поездов / А. В. Агунов, В. М. Варенцов, А. Н. Марикин, Д. А. Соколов. – Текст : непосредственный // *Электротехника*. – 2020. – № 10. – С. 27–30.
5. Соколов, Д. А. Анализ потерь мощности в контактной сети при поперечной емкостной компенсации / Д. А. Соколов, А. В. Агунов. – Текст : непосредственный // *Бюллетень результатов научных исследований*. – 2017. – № 4 (25). – С. 199–207.
6. Соколов, Д. А. Потери мощности в проводах контактной сети железных дорог переменного тока при установке компенсирующего устройства в середине межподстанционной зоны с учетом движения по ней поездов / Д. А. Соколов. – Текст : непосредственный // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. – 2017. – № 3 (52). – С. 471–480.
7. Agunov A. V., Komissarov A. D., Seronosov V. V., Stepankaya O. A., Sokolov

D. A. Analysis of power losses in catenary wires in AC electric traction power supply systems when installing a device for shunt compensation of reactive power, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, no. 1151 (12), pp. 70 – 75.

8. Агунов, А. В. Компьютерное моделирование системы тягового электроснабжения переменного тока / А. В. Агунов, А. Н. Марикин, Д. А. Соколов. – Текст : непосредственный // *Электроника и электрооборудование транспорта*. – 2019. – № 5. – С. 38–40.
9. Агунов, А. В. Моделирование систем электроснабжения / А. В. Агунов, Д. А. Соколов. – Текст : непосредственный // *Электроэнергетические комплексы и системы: история, опыт, перспектива : сборник научных трудов всероссийской научно-технической конференции с международным участием*. – Хабаровск : Дальневосточный гос. ун-т путей сообщения, 2020. – С. 167–170.

Literature:

1. Herman, L. A. Regulated installations of capacitive compensation in traction power supply systems of railways / L. A. Herman, A. S. Serebryakov. – Moscow : Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport, 2015. – 316 p. – Text : direct.
2. STO RZD 07.022.2–2015. The system of traction power supply of an alternating current railway. Methodology for the selection of locations and power of means of longitudinal and transverse compensation of reactive power // consultant.ru : website. – Text : electronic. – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=646626#eiD3RnSYLxEu7Jti> (accessed: 10/28/2021).
3. Agunov A.V., Varentsov V. M., Marikin A. N., Sokolov D. A. Calculation of Power Losses in a DC Traction Power-Supply System with Allowance for Train Traffic, *Russian Electrical Engineering*, 2020, No. 91 (10), pp. 617 - 619.
4. Loss Calculations capacities in the DC traction power supply system taking into account the movement of trains / A.V. Agunov, V. M. Varentsov, A. N. Marikin,

- D. A. Sokolov. – Text : direct // Electrical Engineering. – 2020. – No. 10. – pp. 27-30.
5. Sokolov, D. A. Analysis of power losses in the contact network with transverse capacitive compensation / D. A. Sokolov, A.V. Agunov. – Text : direct // Bulletin of the results of scientific research. – 2017. – № 4 (25). – Pp. 199-207.
 6. Sokolov, D. A. Power losses in the wires of the AC railway contact network when installing a compensating device in the middle of the inter-substation zone, taking into account the movement of trains along it / D. A. Sokolov. – Text : direct // News of the St. Petersburg University of Railway Transport. – 2017. – № 3 (52). – Pp. 471-480.
 7. Agunov A.V., Komissarov A.D., Seronosov V. V., Stepankaya O. A., Sokolov D. A. Analysis of power losses in catenary wires in AC electric traction power supply systems when installing a device for shunt compensation of reactive power, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, no. 1151 (12), pp. 70-75.
 8. Agunov, A.V. Computer modeling of an alternating current traction power supply system / A.V. Agunov, A. N. Marikin, D. A. Sokolov. – Text : direct // Electronics and electrical equipment of transport. – 2019. – No. 5. – pp. 38-40.
 9. Agunov, A.V. Modeling of power supply systems / A.V. Agunov, D. A. Sokolov. – Text : direct // Electric power complexes and systems: history, experience, perspective : collection of scientific papers of the All-Russian scientific and technical conference with international participation. – Khabarovsk : Far Eastern State University of Railways, 2020. – pp. 167-170.

© Юй Ихань, Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник», номер 6/2022.

Для цитирования: Юй Ихань МЕТОДИКА ВЫБОРА КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА // Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник», номер 6/2022.