

УДК 621:331.3.024:621.316.072.2

Борис Алексеевич Аржанников, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург,
Игорь Олегович Набойченко, кандидат технических наук, главный инженер Свердловской железной дороги — филиала ОАО «РЖД», Екатеринбург

УСИЛЕНИЕ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА 3,0 КВ ПРИ ПРОПУСКЕ ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ ПОЕЗДОВ

Boris Alexeyevich Arzhannikov, DSc in Engineering, Professor, Department of Transport Power Supply, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg,
Igor Olegovich Naboychenko, PhD in Engineering, Lead Engineer of Sverdlovsk railway — branch of JSC Russian Railways, Ekaterinburg

3.0 kV DC traction power supply system amplification for heavy train traffic

Аннотация

Рассмотрена работа системы бесконтактного автоматического регулирования напряжения (БАРН) при пропуске тяжеловесных поездов массой 6300, 9000 и 12000 т на направлении Тюмень — Екатеринбург — Пермь — Балезино. Выполнены электрические расчеты системы тягового электроснабжения (СТЭ) по пропускной способности. Сделано сравнение технико-экономической эффективности работы СТЭ с системой БАРН и без нее.

Ключевые слова: тяжеловесный поезд, электровоз, тяговая подстанция, контактная сеть, регулирование напряжения, тяговый режим, рекуперация, удельный расход электрической энергии, потери электрической энергии, скоростной пассажирский поезд, капитальные затраты.

Summary

Operation of non-contact automatic voltage regulation system (NAVR) is analyzed for heavy train (6300, 9000 and 12000 tons) traffic on Tyumen — Ekaterinburg — Perm — Balezino route. Analysis of electrical parameters of traction power supply (TPS) system has been performed in terms of capacity. The comparison of technical and economic efficiency of TPS has been performed for operation with NAVR system and without it.

Keywords: heavy train, locomotive, traction substation, contact network, voltage regulation, traction mode, recuperation, specific consumption of electric energy, loss of electrical power, high-speed passenger train, capital costs.

Создание транспортных коридоров для организации движения тяжеловесных грузовых поездов и пассажирских скоростных поездов с одновременным повышением технико-энергетической эффективности системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ требует повышения напряжения на токоприемнике электровоза при условии сохранения потребляемой мощности.

Для выполнения этого требования возможны следующие решения:

- перевод участков с постоянного тока напряжением 3,0 кВ на переменный ток напряжением 25 кВ;

- применение системы электрификации постоянного тока повышенного напряжения 12 или 24 кВ;

- строительство дополнительных тяговых подстанций (ТП), уменьшающих длину межподстанционных зон;

- использование регулируемых по напряжению в диапазоне 3300–3800 В преобразовательных агрегатов повышенной мощности или подключение регулируемых вольтодобавочных агрегатов к нерегулируемым преобразовательным агрегатам;

- применение буферной системы тягового электроснабжения (БСТЭ) — одновременное использование на участке (направлении) тяговых подстанций с регулируемыми по напряжению в диапазоне 3300–3800 В преобразовательных агрегатов повышенной мощности и одноагрегатных ТП с нерегулируемыми преобразовательными агрегатами.

Рассмотрим каждое из этих решений.

Перевод участков с постоянного тока на переменный оправдан величиной напряжения — 3 кВ и 25 кВ. Однако опыт эксплуатации системы переменного тока 25 кВ, 50 Гц показал, что электрическая тяга на переменном токе «породила новые проблемы, которые не решены окончательно до сих пор» [1] и обладает такими основными недостатками [2]:

- несимметричность нагрузки вызывает появление токов и напряжений обратной последовательности и, как следствие,

увеличение потерь в питающей сети, а также в силовых трансформаторах подстанций на 25–100%;

мощность силовых трансформаторов используется только на 68% от номинальной;

вынужденное применение схемы «винта», малоэффективной для симметрирования нагрузок тяги в питающей сети, заставляет сооружать на каждой ТП нейтральные вставки, вызывающие проблему секционных изоляторов при прохождении нейтральных вставок;

мощности тяговых подстанций используются плохо, так как питание тяговой нагрузки осуществляется только от двух подстанций, что ведет к завышению их установленной мощности на 15–20%;

неодинаковые углы сдвига между векторами токов и напряжений фаз трансформаторов приводят к повышенным потерям напряжения на этих фазах и в тяговой сети.

Кроме указанных основных недостатков проблемными вопросами системы переменного тока остаются обеспечение электромагнитной совместимости и соблюдение экологических требований в границах мегаполисов и ближайших пригородов.

Создание системы постоянного тока повышенного напряжения 12 или 24 кВ началось с разработки системы напряжением 6 кВ, предпринятой в 1960-е гг. (МЭИ), продолжено в 1980-е и 1990-е гг. на Октябрьской железной дороге на напряжении 12 кВ (ПГУПС, МГУПС, РГОТУПС) по заказу ЦЭ МПС, однако в 1995 г. было прекращено из-за отсутствия финансирования.

Строительство промежуточных дополнительных тяговых подстанций связано с нерациональным завышением установленной мощности и со значительными капитальными затратами (стоимость одноагрегатной ТП — 500 млн руб., двухагрегатной — 750 млн руб.).

Применение регулируемых преобразовательных агрегатов повышенной мощности в системе БАРН позволяет в зависимости от поездной обстановки обеспечить:

автоматическую стабилизацию напряжения на шинах тяговых подстанций на заданном уровне;

автоматическое повышение напряжения на шинах тяговых подстанций при снижении напряжения на постах секционирования до минимально допустимого уровня при движении электроподвижного состава в режиме тяги;

снижение напряжения на шинах тяговых подстанций при переходе работы электровозов в режим рекуперативного торможения с обеспечением передачи энергии рекуперации через шины ТП на соседние межподстанционные зоны электровозам, работающим в тяговом режиме.

Функциональная схема системы БАРН преобразовательного агрегата, включающего выпрямительный блок, преобразовательный трансформатор ТРДП-16000/10, реактор РТДП-6300/10 и шкаф автоматического управления напряжением ШАУН5-У4, приведена на рис. 1.

Как видно из рис. 2, на котором показан динамический характер процесса регулирования напряжения в системе БАРН преобразовательного агрегата, при набросе тока нагрузки с 1500 до 4000 А напряжение стабилизации 3500 В снижается до 3000 В и восстанавливается через 40 мс (два периода).

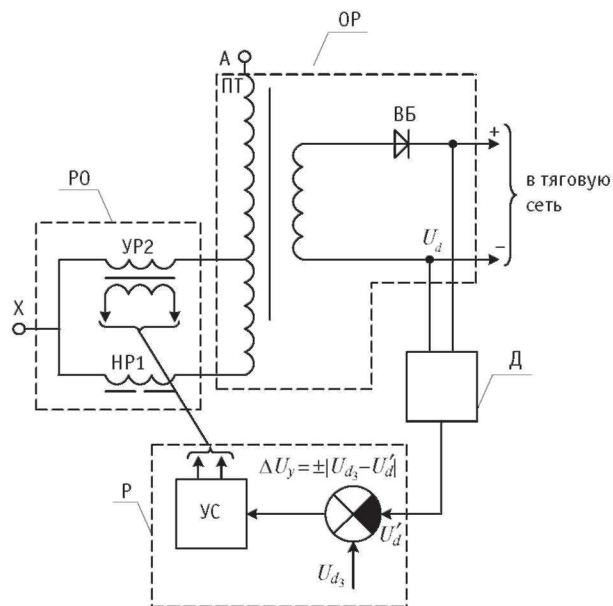


Рис. 1. Электрическая функциональная схема системы БАРН:
 ОР — объект регулирования; ПТ — преобразовательный трансформатор ТРДП-16000/10; ВБ — выпрямительный блок;
 РО — регулирующий орган (НР1–УР2) — реактор РТДП-6300/10;
 Р — регулятор ШАУН5-У4; Д — датчик напряжения

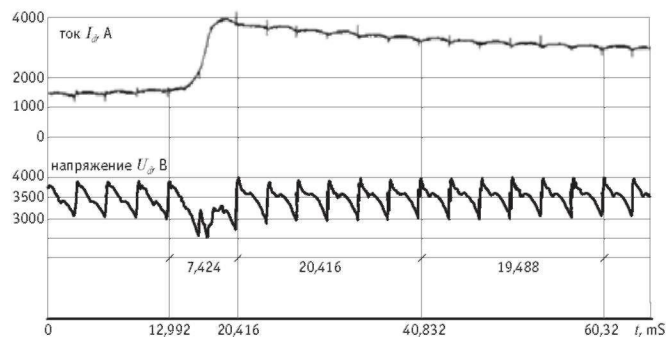


Рис. 2. Процесс регулирования напряжения U_d на уровне 3500 В в системе БАРН при изменении тока I_d с 1500 до 4000 А

На рис. 3 представлены уровни стабилизированного напряжения (с погрешностью $\pm 0,6\%$) двух тяговых подстанций и напряжение на токоприемнике электровоза, находящегося на межподстанционной зоне Сабик — Кузино Свердловской железной дороги.

Электрический расчет СТЗ с системой БАРН. Для дополнительного подтверждения возможности и необходимости усиления СТЗ с помощью системы БАРН, оценки ее технико-энергетической эффективности и определения режимов работы системы БАРН произведем электрический расчет СТЗ при пропуске тяжеловесных поездов в пакете массой 6300 т, 9000 т, 12400 т (сдвоенный 6200 т + 6200 т) на участке с тяжелым горным профилем пути Екатеринбург-Сортировочный — Шала и на всем направлении Войновка (Тюмень) — Екатеринбург — Пермь — Чепца.

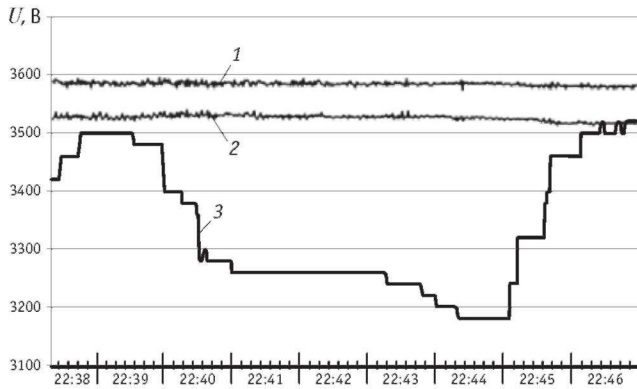


Рис. 3. График изменения напряжения на шинах тяговых подстанций на токоприемнике электровоза:
1 — ТП Кузино; 2 — ТП Сабик; 3 — электровоз 2ЭС10 (№ 22)

Методика электрического расчета СТЭ с системой БАРН на тяговых подстанциях включает следующие этапы:

тяговый расчет на участке (тип электровоза, масса поезда, скорость движения) с $U_3 = 3000$ В, т.е. определение на участке токов электровоза;

электрический расчет СТЭ на участке с токами из тягового расчета с естественными характеристиками тяговых подстан-

ций при $U_{xx} = 3500$ В, т.е. определение расхода электроэнергии (ЭЭ) на тягу $A_{т. U_{xx}}$;

расчет поправочных коэффициентов K_B для снижения токов электровоза при стабилизации системой БАРН напряжения на ТП на различных уровнях в диапазоне 3500–3800 В;

электрический расчет СТЭ на участке с системой БАРН на тяговых подстанциях при различных уровнях стабилизации напряжения — определение расхода ЭЭ на тягу $A_{т. U_{СТ}}$;

уточнение расчетного поправочного коэффициента и выполнение нового электрического расчета СТЭ при отличии $A_{т. U_{СТ}}$ от $A_{т. U_{xx}}$, например, более чем на 1 %.

Результаты электрического расчета СТЭ (выполнены по программе КОРТЭС) с системой БАРН на участке Екатеринбург-Сортировочный — Шаля (длина 134,7 км, 8 тяговых подстанций, 7 межподстанционных зон с ПС и ППС) приведены на рис. 4.

Условия расчета:

в нечетном направлении движутся пакеты из трех поездов массой 6300 т — 6300 т — 6300 т или 6300 т — 9000 т — 6300 т с локомотивами 1,5хВЛ11, 2хВЛ11, 2хЭС6, 2ЭС10, 1,5х2ЭС10, интервал движения внутри пакета — 10 мин;

в четном направлении — поезда массой 5000 т с локомотивом 1,5хВЛ11, интервал движения — 10 мин.

Проверим пропускную способность СТЭ участка по обеспечению минимального допустимого напряжения в контактной сети 2700 В.

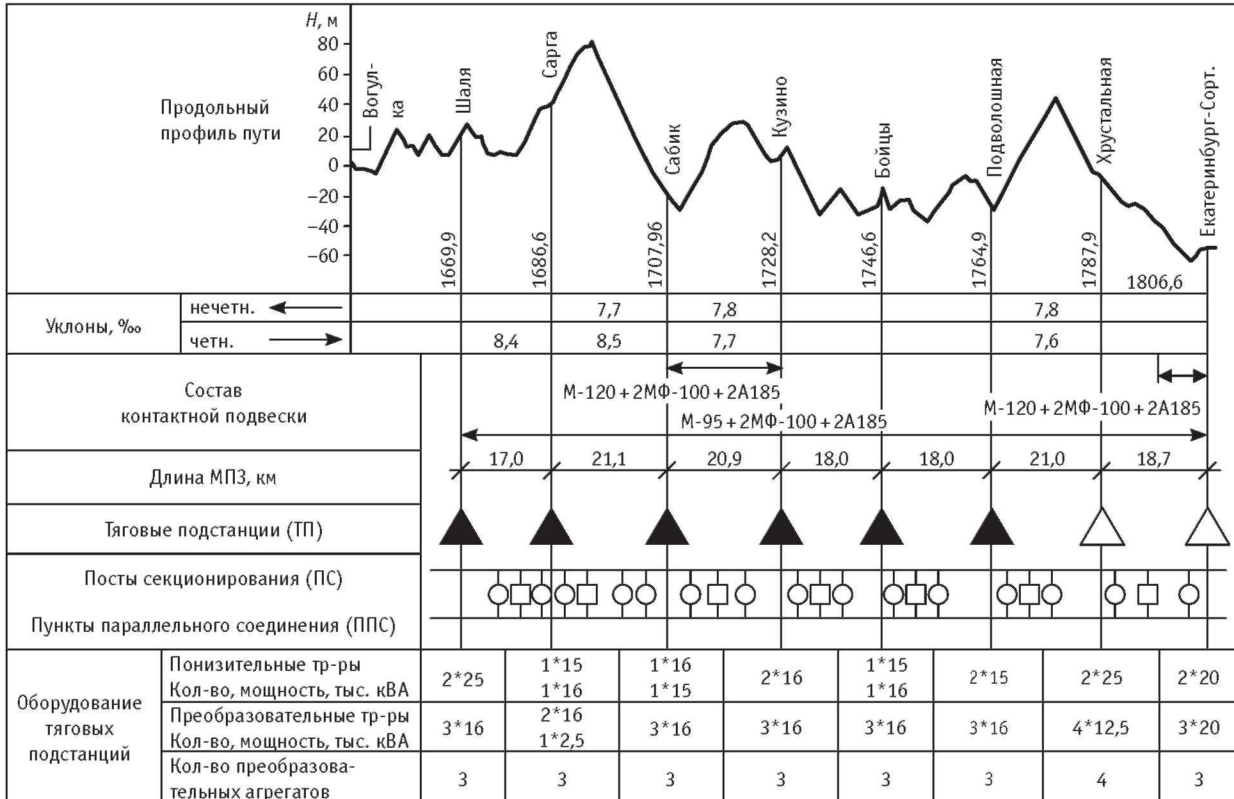


Рис. 4. Характеристика участка Екатеринбург-Сортировочный — Шаля:

○ — пункт параллельного соединения; □ — пост секционирования;
▲ — существующая ТП с регулированием; △ — существующая ТП без регулирования

В отсутствие на тяговых подстанциях системы БАРН (работа по естественным «падающим» характеристикам с $U_{xx} = 3500$ В) при пропуске пакета из поездов массой 6300 т — 6300 т — 6300 т с электровозами 1,5xВЛ11, 1,5xВЛ11, 1,5xВЛ11 из 7 межподстанционных зон не проходят по минимальному напряжению в контактной сети (2700 В) 2/2 зоны*; с электровозами 2x2ЭС6, 2x2ЭС6, 2x2ЭС6 — 5/5 зон; с электровозами 2ЭС10, 2ЭС10, 2ЭС10 — 2/1 зоны.

При пропуске пакета из поездов массой 6300 т — 9000 т — 6300 т с электровозами 1,5xВЛ11, 2xВЛ11, 1,5xВЛ11 из 7 межподстанционных зон по минимальному напряжению в контактной сети (2700 В) не проходят 5/3 зоны; с электровозами 2x2ЭС6, 2x2ЭС6, 2x2ЭС6 — 5/5 зон; с электровозами 2ЭС10, 1,5x2ЭС10, 2ЭС10 — 5/5 зон.

При включении системы БАРН на тяговых подстанциях все 7 зон участка проходимы с напряжением стабилизации для составов из пакета поездов массой 6300 т — 6300 т — 6300 т и с электровозами для каждого поезда:

1,5xВЛ11	$U_{ст} = 3500$ В
2x2ЭС6	$U_{ст} = 3600$ В
2ЭС10	$U_{ст} = 3500$ В

То же для составов с поездами в пакете массой 6300 т — 9000 т — 6300 т и с электровозами для соответствующего поезда:

(1,5xВЛ11) — (2xВЛ11) — (1,5xВЛ11)	$U_{ст} = 3600$ В
(2x2ЭС6) — (2x2ЭС6) — (2x2ЭС6)	$U_{ст} = 3750$ В
(2ЭС10) — (1,5x2ЭС10) — (2ЭС10)	$U_{ст} = 3600$ В

В настоящее время в условиях эксплуатации при работе СТЭ с системой БАРН на тяговых подстанциях участка Екатеринбург-Сортировочный — Шаля (и далее Пермь — Балезино) установлен уровень стабилизации напряжения 3650 В.

Рассмотрим технико-энергетические показатели работы СТЭ с системой БАРН на тяговых подстанциях на этом участке.

1. Изменение удельного расхода и удельной рекуперации электрической энергии.

При сохранении неизменными массы и скорости движения поездов, т.е. мощности электровоза в каждой точке пути и соответственно расхода ЭЭ на тягу, с повышением напряжения на тяговых подстанциях (и в контактной сети) снижается ток электровоза, а также потери ЭЭ в контактной сети $\Delta A_{тс}$ и удельный расход ЭЭ на тягу $a_{т}$. Но одновременно снижается удельная рекуперация $a_{р}$.

При повышении напряжения на тяговых подстанциях с $U_{xx} = 3500$ В до $U_{ст} = 3700$ В при движении по участку поездов с пакетами 6300 т — 6300 т — 6300 т $\Delta A_{тс}$ и $a_{т}$ снижаются соответственно в среднем на 1,7 и на 3,26%. При этом удельная рекуперация $a_{р}$ снижается на 1,02%.

Для поездов с пакетами массой 6300 т — 9000 т — 6300 т $\Delta A_{тс}$ и $a_{т}$ снижаются соответственно в среднем на 2,2 и на 3,94%. Удельная рекуперация ЭЭ $a_{р}$ снижается при этом на 11,52%.

2. Использование электрической энергии рекуперации.

На двухпутном участке с тяжелым горным профилем Екатеринбург-Сортировочный — Шаля в среднем 97% рекуперированной ЭЭ используется электровозами, работающими в режиме тяги, и 2,5–3% — это избыточная электрическая энергия, предназначенная для инвертирования.

Применение системы БАРН для пропуска скоростных пассажирских поездов. Рассмотрим мощностные возможности системы БАРН. Номинальная мощность часового режима электровоза 2ЭС10 составляет 8800 кВт, пассажирского поезда Velaro RUS — 8000 (9200 кВт**). При пропуске поезда массой 9000 т суммарная мощность электровоза 1,5x2ЭС10 равна 13200 кВт, что в 1,65 (1,43) раза превышает мощность Velaro RUS.

Система БАРН обеспечивает пропуск поездов в пакете массой 6300 т — 9000 т — 6300 т с электровозами 2ЭС10 — 1,5x2ЭС10 — 2ЭС10 при уровне стабилизации напряжения на тяговых подстанциях $U_{ст} = 3600$ В. Мощность преобразовательных агрегатов с трансформаторами ТРДП-16000/10 используется на 94,736% от номинальной, равной 12160 кВт, и составляет 11520 кВт.

Возможно дальнейшее увеличение мощности СТЭ с БАРН на 5,264% при уровне стабилизации напряжения на тяговых подстанциях $U_{ст} = 3800$ В.

При встречном движении по четному пути грузовых поездов массой 5000 т (1,5xВЛ11) с интервалом 10 мин на участке Екатеринбург-Сортировочный — Шаля с системой БАРН на 8 тяговых подстанциях с межподстанционными расстояниями до 21 км скорый поезд Velaro RUS проходит участок со скоростью 200 км/ч при стабилизации напряжения на шинах ТП на уровне $U_{ст} = 3500$ В и со скоростью 300 км/ч — на уровне $U_{ст} = 3600$ В.

При межподстанционном расстоянии 28,8 км Velaro RUS проходит участок со скоростью 250 км/ч при напряжении $U_{ст} = 3700$ В.

При увеличении межподстанционного расстояния до 38,3 км Velaro RUS не проходит участок со скоростью 200 км/ч при повышении напряжения до максимального уровня стабилизации $U_{ст} = 3800$ В.

Пропуск скоростного поезда Velaro RUS по участку без встречного движения грузовых поездов при межподстанционном расстоянии 38,3 км может быть осуществлен со скоростью 200 км/ч при $U_{ст} = 3700$ В.

Применение буферной системы тягового электроснабжения при пропуске тяжеловесного поезда массой 9000 т с электровозом 1,5x2ЭС10. Результаты расчета СТЭ при пропуске поездов в пакете массой 6300 т — 9000 т — 6300 т с электровозами 2ЭС10 — 1,5x2ЭС10 — 2ЭС10 по зоне Верецагино — Бородулино, имеющей протяженность 24,6 км, показывают, что при стабилизации напряжения на ТП на уровне 3700 В межпоездной интервал составляет 16 мин. Остановоч-

*В числителе — без рекуперации ЭЭ, в знаменателе — с рекуперацией ЭЭ.

**Вместе с мощностью собственных нужд.

ный пункт Субботники работает в качестве поста секционирования и располагается на расстоянии 16,4 км от ТП Бородулино (на своем месте, без сдвига).

При использовании поста секционирования Субботники в качестве одноагрегатной ТП с $U_{xx} = 3500$ В и при стабилизации напряжения на тяговых подстанциях $U_{ст} = 3700$ В пропуск поездов в пакете массой 6300 т — 9000 т — 6300 т происходит с заданным межпоездным интервалом 6 мин.

Применение буферной системы тягового электроснабжения при пропуске состыкованного поезда массой 6200 т + 6200 т с электровозами 2ЭС10. При пропуске поездов в пакете массой 6200 т — (6200 т + 6200 т) — 6200 т с электровозами 2ЭС10 по межподстанционной зоне Верещагино — Бородулино с постом секционирования Субботники стабилизация системой БАРН напряжения на тяговых подстанциях на максимальном уровне 3800 В обеспечивает межпоездной интервал 16 мин, что превышает принятую для расчета величину 6 мин, т.е. зона Верещагино — Бородулино является непроходимой.

Если принимается решение о строительстве промежуточных тяговых подстанций с БАРН, то это вызывает при двухагрегатных ТП завышение установленных мощностей, а при одноагрегатных — отключение подстанции от значительных токов нагрузки электровозов с поездами повышенной массы.

Рассмотрим другой путь устранения проблемы непроходимости зоны Верещагино — Бородулино, не связанный со строительством дополнительных подстанций с БАРН, а основанный на применении БСТЭ.

Установка БСТЭ с напряжением стабилизации на ТП Верещагино и Бородулино 3700 В и на одноагрегатной ТП Субботники напряжения $U_{xx} = 3500$ В показала, что при пропуске по этой зоне поездов в пакете массой 6200 т — (6200 т + 6200 т) — 6200 т межпоездной интервал составил 17 мин.

Повышение в БСТЭ уровня стабилизированного напряжения на ТП Верещагино и Бородулино до 3800 В, а на ОТП Субботники напряжения $U_{xx} = 3500$ В также не обеспечило пропуск указанной категории поездов с межпоездным интервалом 6 мин, а только с интервалом 13 мин.

Кроме того, повышенный уровень стабилизации напряжения 3800 В на тяговых подстанциях нежелателен, так как ведет к ограничению рекуперации ЭЭ и к увеличению расхода ЭЭ на собственные нужды электровозов и отопление пассажирских поездов.

Снижение расстояния от ОТП Субботники до ТП Бородулино с 16,4 до 14,8 км обеспечивает пропуск поездов в пакете массой 6200 т — (6200 т + 6200 т) — 6200 т с межпоездным интервалом 6 мин при напряжениях на ТП Бородулино и Верещагино $U_{ст} = 3700$ В и на ОТП Субботники $U_{xx} = 3500$ В.

Применение БСТЭ на зоне Сысерть — Макарьево. Зону Сысерть — Макарьево поезд в пакете 6200 т — (6200 т + 6200 т) — 6200 т проходит с межпоездным интервалом 15 мин, что превышает принятую для расчета величину 6 мин. Эта зона является непроходимой при максимальном уровне стабилизации напряжения на тяговых подстанциях 3800 В.

Введение на зоне БСТЭ, т.е. установка промежуточной одноагрегатной ТП «30-й км» с напряжением холостого хода 3500 В и со стабилизацией напряжения на тяговых подстанциях на уровне 3700 В, позволила обеспечить пропуск поездов с межпоездным интервалом 6 мин.

Расчеты оценки эффективности применения системы БАРН при пропуске с межпоездным интервалом 10 мин поездов в пакете массой 6200 т — 12400 т — 6200 т по главному ходу от ст. Войновка до ст. Балезино с электровозами 2ЭС6 (на зоне Войновка — Седельниково) и 2ЭС10 (Седельниково — Балезино) показали, что без системы БАРН с напряжением холостого хода тяговых подстанций $U_{xx} = 3600$ В на направлении Войновка — Балезино (Пибаньшур) потребуется строительство 17 дополнительных подстанций. При введении системы БАРН с установкой стабилизированного напряжения на уровне $U_{ст} = 3600$ В необходимо строительство девяти, на уровне $U_{ст} = 3700$ В — шести, на уровне $U_{ст} = 3800$ В — двух дополнительных подстанций.

Стоимость 17 тяговых подстанций без БАРН составляет $750 \cdot 17 = 12750$ млн руб., а при принимаемом уровне стабилизации напряжения 3700 В стоимость 6 двухагрегатных тяговых подстанций с БАРН составит $750 \cdot 6 = 4500$ млн руб. При замене дополнительных двухагрегатных регулируемых тяговых подстанций с БАРН на одноагрегатные нерегулируемые ТП [3] с $U_{xx} = 3500$ В и на основных тяговых подстанциях с напряжением стабилизации $U_{дст} = 3700$ В (введение буферной СТЭ) стоимость 6 одноагрегатных ТП составит $500 \cdot 6 = 3000$ млн руб.

Отсюда следует, что при пропуске поездов в пакете массой 6200 т — 12400 т — 6200 т на направлении от ст. Войновка до ст. Балезино экономия капитальных затрат при введении БАРН на ТП составит без БСТЭ 8250 млн руб., а с БСТЭ — 9750 млн руб.

Литература

1. Курбасов А. С. Радикальное повышение производительности электровозов при использовании асинхронного тягового двигателя // Электрификация и развитие энергосберегающей инфраструктуры и электроподвижного состава на железнодорожном транспорте : матер. Третьего междунар. симп. «Элтранс-2005», 15–17 ноября 2005 г. СПб. : ПГУПС, 2007. 720 с.
2. Мамошин Р. Р. Новые технологии электроснабжения железных дорог на переменном токе // Евразия Вести. Безопасность железнодорожного транспорта. 2007. Апрель. С. 11.
3. Аржаников Б. А., Левин А. М. Одноагрегатная регулируемая подстанция // Железнодорожный транспорт. 1991. № 8. С. 44–46. ISSN 0044-4448.

References

1. Kurbasov A. S. Radikalnoe povyshenie proizvoditel'nosti elektrovozov pri ispol'zovanii asinkhronnogo tyagovogo dvigatelya [Boosting productivity of locomotives using asynchronous propulsion traction motor] // Elektrifikatsiya i razvitie energosberegayushchey infrastruktury i elektropodvizhnogo sostava na zheleznodorozhnom transporte : mater. Tret'ego mezhdunar. simp. «Eltrans-2005», 15–17 noyabrya 2005 g. SPb. : PGUPS, 2007. 720 p.
2. Mamoshin R. R. Novye tekhnologii elektrosnabzheniya zheleznikh dorog na peremennom toke [New technologies of AC railway power supply] // Evraziya Vesti. Bezopasnost zheleznodorozhnogo transporta. 2007. April. P. 11.
3. Arzhannikov B. A., Levin A. M. Odnoagregatnaya reguliruemaya podstantsiya [Single-unit adjustable substation] // Zheleznodorozhnyy transport. 1991. № 8. P. 44–46. ISSN 0044-4448.