

УДК 629.4.069

Исследование работы инверторной системы запуска дизельного двигателя при эксплуатации тепловоза ЗТЭ28

А. А. Плешаков¹, А. М. Евстафьев², И. А. Ролле²

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Россия, 140402, Московская обл., г. Коломна, ул. Октябрьской революции, 410

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Плешаков А. А., Евстафьев А. М., Ролле И. А. Исследование работы инверторной системы запуска дизельного двигателя при эксплуатации тепловоза ЗТЭ28 // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. Вып. 4. С. 61–77. DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-61-77

Аннотация

Цель: анализ результатов эксплуатационных испытаний пускового преобразователя в качестве устройства предварительной раскрутки дизельного двигателя тепловоза ЗТЭ28 и анализ полученных результатов. **Методы:** проводилось исследование функционирования системы инверторного запуска в рамках ее эксплуатации в составе тепловоза при различных условиях пуска дизельного двигателя (остаточное напряжение аккумуляторной батареи, температура масла) с применением измерительного комплекса и комплекта дополнительных датчиков, а также накопление и анализ полученных результатов измерений. **Результаты:** проведены эксплуатационные испытания инверторной системы запуска силовой установки на тепловозе ЗТЭ28 в локомотивном депо «Тында-Северная». Верифицированы схмотехнические решения и алгоритмы автоматической системы управления преобразователя. Выполнен сравнительный анализ энергетической эффективности инверторной и стартер-генераторной систем запуска двигателей. **Практическая значимость:** по результатам эксплуатационных испытаний подтверждена возможность применения пусковых преобразователей для надежного запуска дизельных двигателей тепловозов, оборудованных синхронными тяговыми агрегатами, вместо широко распространенных на сегодняшний день стартер-генераторных систем запуска. Разработанное техническое решение может быть тиражировано на другие серии локомотивов, как вновь разрабатываемые, так и эксплуатирующиеся в рамках их модернизации или ремонта. Накопленные в эксплуатации данные могут быть использованы для дальнейшего совершенствования алгоритмов системы управления пускового преобразователя.

Ключевые слова: тепловоз, дизель-генератор, инверторная система запуска, пусковой преобразователь, синхронный генератор, измерительный комплекс, эксплуатационные испытания.

Введение

Байкало-Амурская магистраль (БАМ) — это одна из наиболее важных транспортных артерий в России, по которой перевозится значительная доля грузов и пассажиров от общего потока в стране. Основная часть магистрали при ее постройке имела однопутную структуру с отдельными двухпутными участками и обустроенными разъездами, предназначенными для пропуска поездов по разным направлениям. Этим фактором во многом ограничивалась пропускная способность

данного участка железных дорог России. Однако шли годы, и структура пассажиро- и грузопотока значительно менялась.

На сегодняшний день вследствие глобального изменения геополитической ситуации в мире и перераспределения транспортных потоков на восток особенно важным для обеспечения транспортной безопасности страны стал Восточный полигон.

Вот уже несколько лет ведется масштабная реконструкция БАМа, которая должна ощутимо увеличить его провозную способность. Для решения поставленной задачи выделяются значительные средства и привлекаются все новые и новые трудовые ресурсы. В 2024 году успешно завершён II этап модернизации и начаты работы по III этапу [1].

В связи с масштабными инфраструктурными изменениями на Дальневосточном полигоне, направленными на увеличение его провозной способности, у ОАО «РЖД» появляется острая потребность в новом более мощном и высокотехнологичном подвижном составе, который будет способен перевозить тяжеловесные составы.

Для решения вышеуказанной задачи инжиниринговым центром «ТМХ Инжиниринг», входящим в состав АО «Трансмашхолдинг», спроектирована новая серия грузовых магистральных тепловозов 3ТЭ28. Проект был реализован в кратчайшие сроки благодаря опыту, накопленному при создании и эксплуатации локомотивов серии 2(3) ТЭ25 различных исполнений. Часть технических решений для нового поколения тепловозов заимствована из конструкции локомотивов 3ТЭ25К2М. Кроме того, были учтены недостатки предыдущих серий тепловозов, выявленные во время эксплуатации.

Тепловоз 3ТЭ28 представляет собой трехсекционный локомотив, силовой установкой которого является 16-цилиндровый дизельный двигатель с турбонаддувом, который приводит во вращение тяговый агрегат, питающий через выпрямительную установку тяговые электродвигатели. В конструкции тепловоза нашли максимально возможное применение российские технические решения и оборудование. Простота и надежность переменного-постоянной тяговой передачи мощности подтверждена многолетним опытом эксплуатации на других видах локомотивов. Использование силовой установки повышенной мощности позволяет тепловозам 3ТЭ28 водить тяжеловесные и длинносоставные грузовые поезда массой до 7100 т на различных полигонах.

Производство новых магистральных тепловозов начато в АО «УК «БМЗ». Первая машина была построена в 2022 году. В ноябре того же года на Московской железной дороге первый локомотив успешно завершил опытный пробег, суммарная протяженность которого превысила 10 тыс. км, а масса поездов составила от 5000 до 7200 т. За время опытной эксплуатации не выявлено технических

неисправностей оборудования локомотива. В начале 2023 года тепловоз 3ТЭ28 № 0001 передан в АО «ВНИКТИ» для проведения приемочных и сертификационных испытаний. И уже осенью 2023 года на основании успешных результатов испытаний конструкторской документации на локомотив присвоена литера «О1», подтверждающая готовность тепловоза к серийному производству. В ноябре 2023 года АО «Трансмашхолдинг» получен сертификат соответствия требованиям ТР ТС 001/2011, который позволяет эксплуатировать магистральные тепловозы 3ТЭ28 на дорогах стран ЕАЭС [2]. В декабре 2023 года на БАМе в локомотивном депо «Тында-Северная» началась эксплуатация первых образцов локомотивов серии 3ТЭ28.

Особенности магистральных тепловозов серии 3ТЭ28

Тепловозы 3ТЭ28 призваны стать альтернативой локомотивам 3ТЭ25К2М, которые оснащались дизельными двигателями GEVO V12 и системами запуска американского производства (General Electric).

Суммарная мощность нового тепловоза составляет 8950 кВт, что делает его одним из наиболее мощных среди эксплуатирующихся на сегодняшний день в нашей стране. Локомотив рассчитан на конструкционную скорость в 100 км/ч. Сила тяги длительного режима составляет не менее 314,8 кН при расчетной скорости 24,64 км/ч.

В состав основного электрооборудования тепловоза входят:

- тяговый агрегат АТ2С-2800/400Х;
- шестиканальный управляемый выпрямитель типа М-ТПП-3600-2-У2 или М-ТПП-1,1к-800-У2;
- электродвигатели постоянного тока ДТК-417К, или ЭДТ-133К, или ЭД133К;
- аккумуляторная батарея 72КН220Р (щелочная) или 16*6СВГП-428РК (кислотная) [3, 4].

Локомотив имеет кабину с узнаваемым экстерьером передней маски, которая применяется на новых сериях электровозов, магистральных и маневровых тепловозов. Кузов окрашен в традиционные корпоративные цвета ОАО «РЖД».

Одной из отличительных особенностей данной серии локомотивов является применение в качестве силовой установки модификации хорошо зарекомендовавшего себя в эксплуатации дизель-генератора 18-9ДГ, получившей обозначение 18-9ДГМ и выпускаемой АО «Коломенский завод».

Основные технические характеристики силовой установки типа 18-9ДГМ приведены в табл. 1 [3, 5].

Внешний вид дизельного двигателя и генераторной установки, смонтированной на одной раме с дизелем, приведен на рис. 1.

ТАБЛИЦА 1. Технические характеристики дизель-генератора 18-9ДГМ

Параметр	Значение
Тип дизеля	16-цилиндровый, четырехтактный, V-образный, с газотурбинным наддувом и охлаждением наддувочного воздуха
Номинальная частота вращения, об/мин	1000 ± 6
Номинальная / максимальная мощность, кВт	2850/3100
Удельный расход топлива, г/кВт · ч	198 ^{+9,9}
Часовой расход топлива в режиме холостого хода, кг/ч, не более	12,5
Система запуска	инверторная
Система управления	электронный блок управления

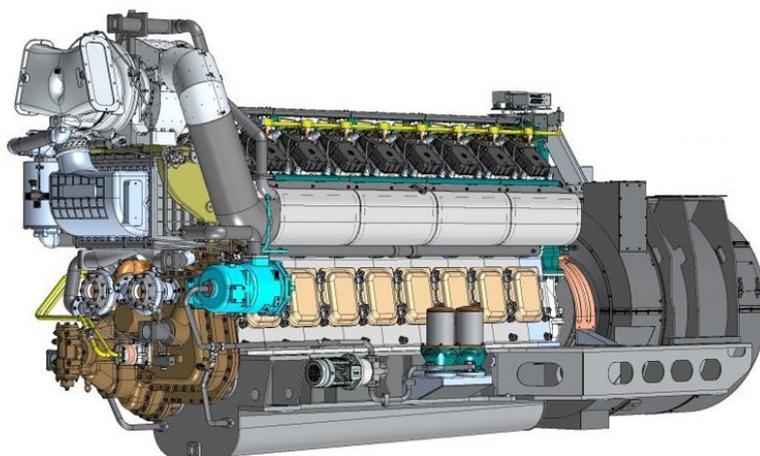


Рис. 1. Силовая установка 18-9ДГМ

Для выработки электрической энергии для питания основных и вспомогательных систем тепловоза применяется тяговый агрегат типа АТ2С-2800/400х. Данная электрическая машина разработана ООО «ТМХ-Электротех» специально для новой серии локомотивов 3ТЭ28 и имеет стандартную конструкцию — тяговый и синхронный генераторы, размещенные в едином корпусе. Каждый генератор имеет две пары трехфазных обмоток, геометрическое расположение которых сдвинуто в пространстве на 120°.

Отличительной особенностью силовой установки описываемой серии локомотивов является инверторная система запуска двигателя вместо широко распространенной на подвижном составе стартер-генераторной. Данное техническое решение предложено специалистами АО «ВНИКТИ».

Принцип работы инверторной системы запуска основан на свойстве обратимости электрических машин. Раскрытку коленчатого вала дизельного двигателя

осуществляет тяговый генератор, для которого пусковой преобразователь формирует необходимое напряжение питания и возбуждения.

Применение инверторного запуска позволило значительно упростить узел распределительного вала, исключив привод стартер-генератора. Данное техническое решение должно снизить количество отказов дизель-генераторной установки, связанной с приводами 69-группы, что положительно повлияет на показатели эксплуатационной надежности локомотива.

Электрическая схема пускового преобразователя построена на современной элементной базе. Важным элементом общей структуры устройства является система автоматического управления и диагностики. Вычислительным ядром платы управления служит мощный 32-разрядный микроконтроллер ARM-архитектуры на ядре Cortex-M4 [6, 7].

Специалистами АО «ВНИКТИ» разработаны собственные алгоритмы управления и диагностики для системы управления преобразователя. Силовая часть устройства построена с применением современных IGBT-модулей последнего поколения, управляемых интеллектуальными драйверами отечественного производства. Подсистема диагностики позволяет реализовать алгоритмы защиты от превышения:

- выходного напряжения;
- тока возбуждения и фазных токов;
- длительности процесса запуска;
- температуры полупроводниковых приборов;
- частоты переключения IGBT-модулей.

Инверторная система позволяет осуществить запуск силовой установки при входном напряжении в диапазоне от 45 до 96 В, ограничивая при этом входной ток на уровне 1700 А, чтобы не допустить глубокой разрядки аккумуляторной батареи. Система автоматического управления сохраняет свою работоспособность при снижении напряжения питания до 36 В. Максимальные выходные параметры:

- ток до 1200 А;
- напряжение до 200 В [8].

3D-модель пускового преобразователя приведена на рис. 2.

Инверторная система запуска подтвердила заявленные характеристики при приемочных и сертификационных испытаниях тепловоза, которые проводились на экспериментальной базе АО «ВНИКТИ».

Комплексное исследование особенностей функционирования системы запуска тепловоза 3ТЭ28

По завершении приемочных и сертификационных испытаний первые образцы локомотивов 3ТЭ28 поступили в эксплуатацию в локомотивное депо «Тында-Северная», где им предстояло выдержать суровые условия окружающей среды, а также сложный профиль пути, которым отличается данный участок БАМа.

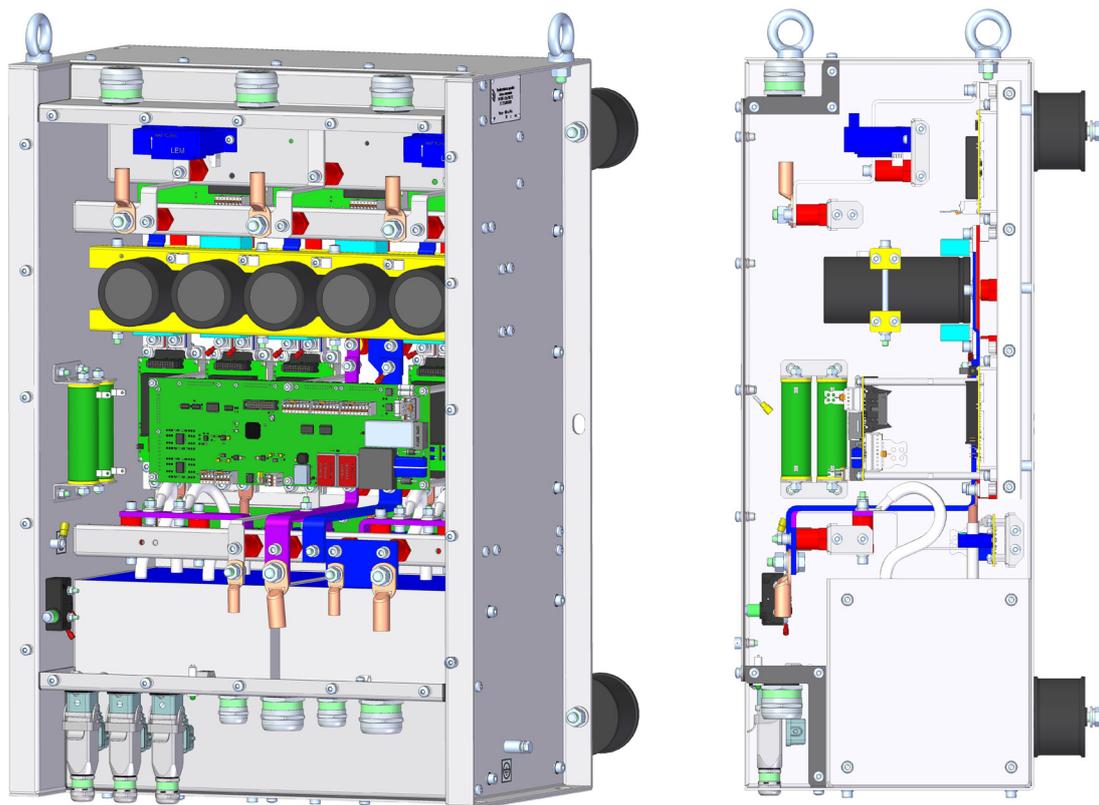


Рис. 2. 3D-модель пускового преобразователя

АО «ВНИКТИ» были продолжены исследования работы системы запуска силовой установки в целях оценки функционирования предложенной концепции в условиях эксплуатации тепловозов и обоснования дальнейшего распространения инверторов для запуска двигателей других серий локомотивов.

В рамках данных исследований летом 2024 года на тепловозе 3ТЭ28 № 0021 был установлен многоканальный измерительный комплекс с комплектом датчиков, позволяющий регистрировать параметры работы пускового преобразователя и записывать данные на SD-накопитель в автоматическом режиме.

Схема подключения испытательного оборудования приведена на рис. 3.

При проведении эксплуатационных испытаний системы инверторного запуска регистрировались следующие параметры при прокрутке коленчатого вала дизельного двигателя:

- ток $I_{аб}$, потребляемый от аккумуляторной батареи;
- напряжение аккумуляторной батареи $U_{аб}$;
- ток $I_{к1}$, потребляемый первым каналом звена повышения входного напряжения;
- напряжение на выходе звена повышения входного напряжения $U_{зпн}$;
- мгновенные значения линейных напряжений U_{uw} и U_{uv} ;

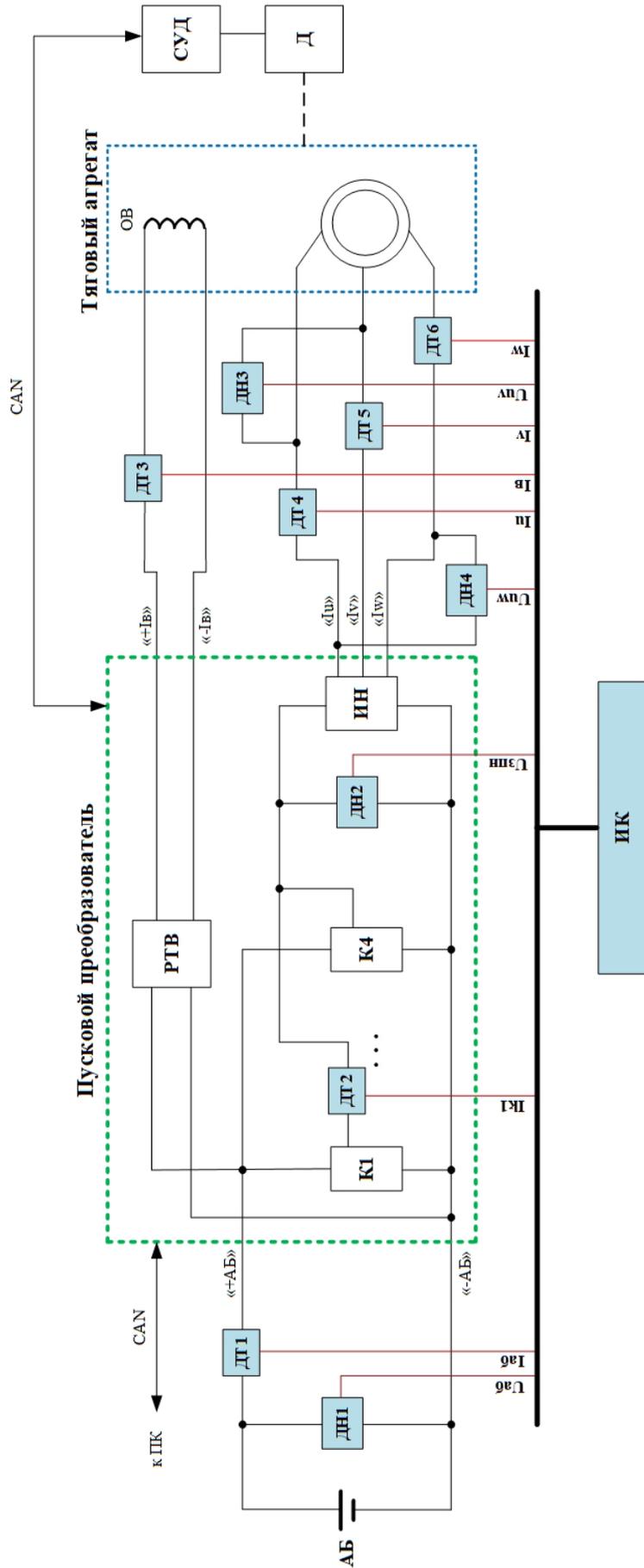


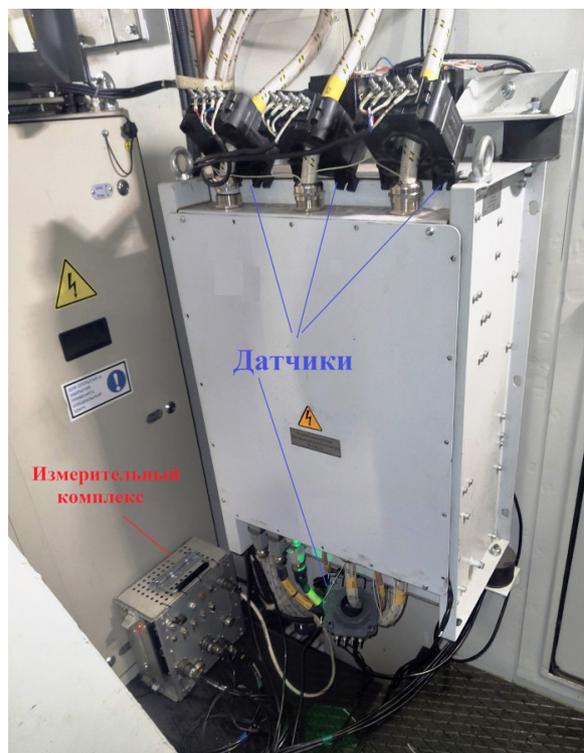
Рис. 3. Схема подключения измерительного комплекса:
 АБ — аккумуляторная батарея; ДН1–ДН4 — датчики напряжения; ДТ1–ДТ6 — датчики тока; ПК — персональный компьютер;
 К1–К4 — канал повышения напряжения; РТВ — регулятор тока возбуждения; ИН — инвертор напряжения; ОБ — обмотка
 возбуждения; СУД — система управления дизеля; Д — дизель; ИК — измерительный комплекс; CAN — интерфейс связи

– ток I_b , протекающий через обмотку возбуждения тягового агрегата;
– мгновенные значения фазных токов статора тягового агрегата I_u, I_v, I_w (одной «звезды»).

Место установки пускового преобразователя на тепловозе приведено на рис. 4а; подключение измерительного комплекса и датчиков — на рис. 4б.



а



б

Рис. 4. Размещение оборудования на тепловозе:

а — пускового преобразователя; б — измерительного комплекса и датчиков

Программное обеспечение измерительного комплекса начинает запись измерений с датчиков на внутренний съемный накопитель при превышении входного напряжения пускового преобразователя значения в 20 В. Напряжение поступает на вход пускового устройства от аккумуляторной батареи только после инициирования запуска дизельного двигателя нажатием соответствующей кнопки на пульте управления машиниста в кабине тепловоза и включения необходимых промежуточных реле и контакторов в схеме локомотива. Частота записи данных на съемный носитель измерительного комплекса при регистрации информации составляет 2 кГц.

Система автоматического управления пускового преобразователя получает от системы управления дизеля по каналу связи CAN задание:

- максимального времени пуска (в секундах);
- сигнала на начало прокрутки;

- максимального значения фазного тока статора (действующее значение);
- начального напряжения в звене повышения напряжения;
- максимального тока возбуждения.

Для просмотра результатов измерений АО «ВНИКТИ» разработана прикладная программа ProViewer vReg, которая преобразует данные из файлов, записанных на съемный накопитель измерительного комплекса, в графический вид.

На рис. 5 представлена осциллограмма мгновенных значений фазных токов статора I_u , I_v , I_w синхронного генератора при задании действующего значения тока от системы управления равного 854 А. Данному заданию соответствует амплитудное значение равное 1204 А.

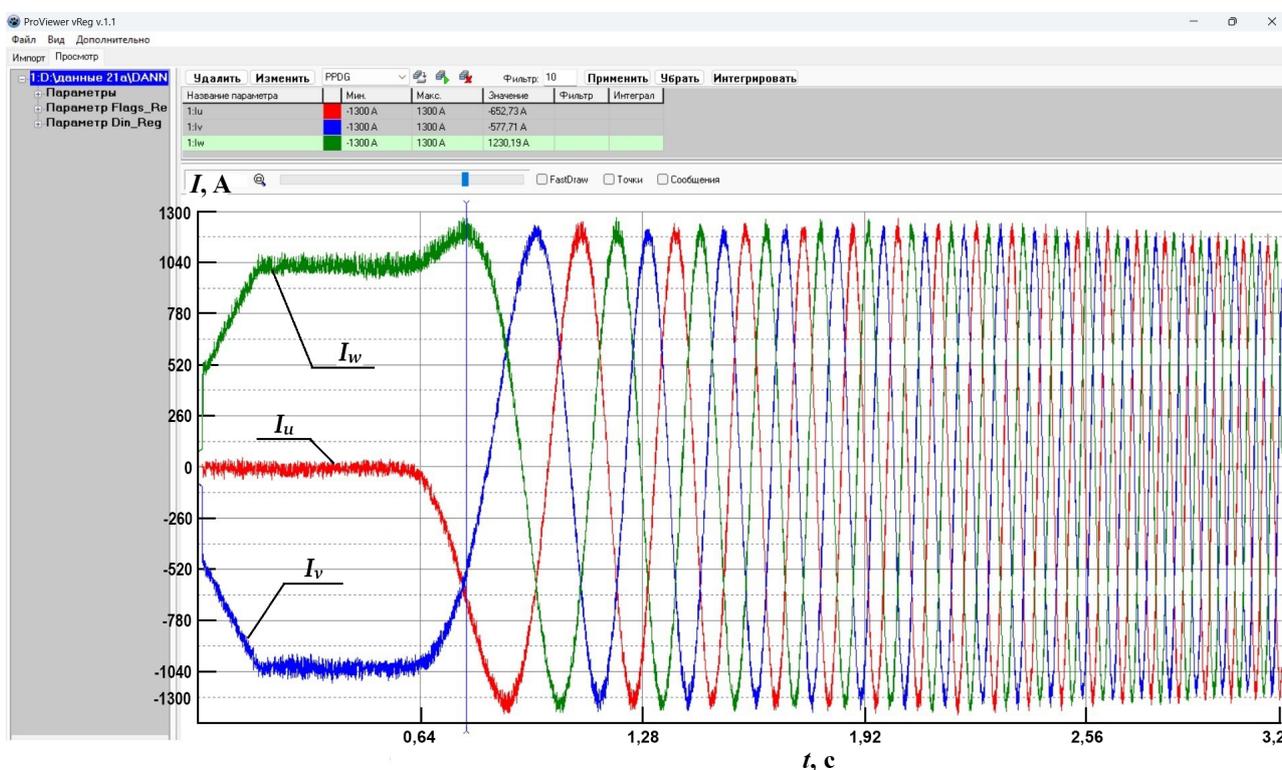


Рис. 5. Осциллограмма мгновенных значений фазных токов

В результате анализа осциллограммы выявлено, что реализованные значения токов соответствуют заданным с учетом ширины полосы гистерезиса $\delta = \pm 34$ А, которая установлена для блока инвертора пускового преобразователя. Система автоматического управления пускового преобразователя обеспечивает плавное изменение частоты и амплитуды трехфазного переменного тока для приведения во вращение ротора синхронной машины, связанного через пластинчатую муфту с коленчатым валом дизельного двигателя.

На рис. 6 представлена осциллограмма изменения напряжения $U_{аб}$ и тока аккумуляторной батареи $I_{аб}$, потребляемого пусковым преобразователем, тока

возбуждения синхронной машины I_B , тока первого канала накачки I_{K1} и напряжения в повышающем звене преобразователя $U_{зпп}$ при следующих начальных значениях заданных параметров:

- ток возбуждения — 120 А;
- напряжение в повышающем звене — 100 В;
- действующее значение фазного тока — 854 А;
- максимальная продолжительность процесса запуска — 12 с.

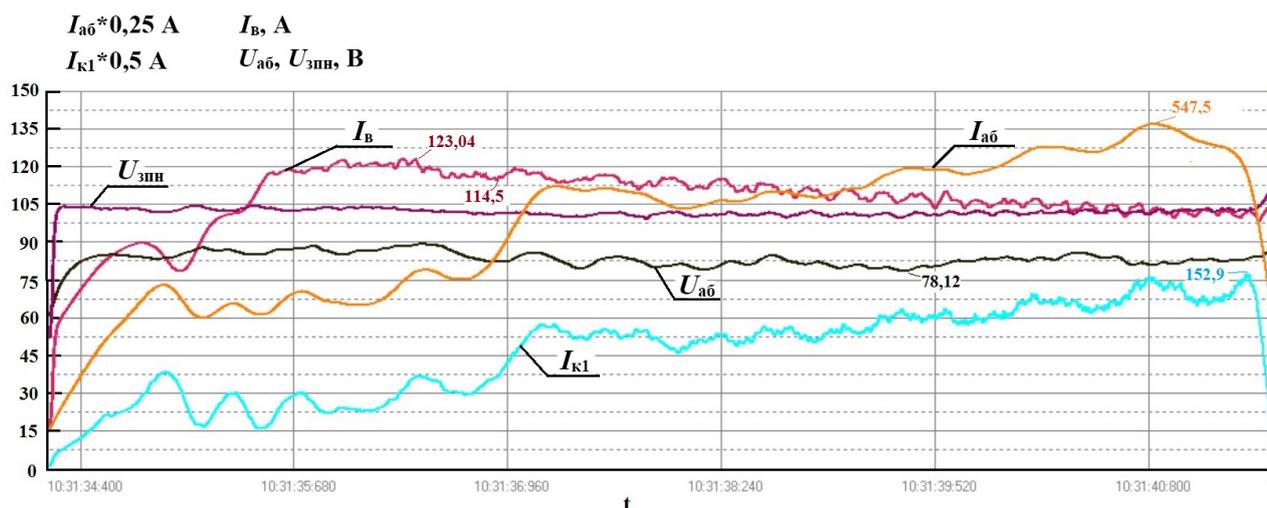


Рис. 6. Осциллограмма $U_{a6}, I_{a6}, I_B, I_{K1}, U_{зпп}$

В результате исследования осциллограмм выявлено следующее:

- длительность процесса запуска не превышает 8 с;
- блок регулятора тока возбуждения формирует ток I_B с учетом ширины полосы гистерезиса $\delta = \pm 10 \text{ A}$ (фактически от 114,5 до 123,04 А);
- напряжение $U_{зпп}$ соответствует заданному значению с допуском $\delta = \pm 10 \text{ В}$ (в диапазоне от 99 до 104,17 В);
- потребление тока от аккумуляторной батареи составляет 547,5 А;
- напряжение аккумуляторной батареи при запуске снизилось до 78,12 В.

На рис. 7 и 8 приведены осциллограммы пусков силовых установок тепловоза ТЭП70БС № 328 и 3ТЭ28 № 0021.

На тепловозе ТЭП70БС в качестве силовой установки применяется дизель-генератор 2А-9ДГ-01 (мощность 2940 кВт), состоящий из 16-цилиндрового V-образного дизеля 16ЧН2А 26/26 и тягового агрегата АСТМ 2800/600-1000 [9], параметры которых сопоставимы с дизель-генератором 18-9ДГМ.

Для построения графиков зависимостей основных параметров запуска для тепловоза ТЭП70БС использованы данные автоматизированной системы контроля параметров работы дизельного подвижного состава и учета дизельного топлива. Диагностические параметры фиксируются данной системой 2 раза в секунду.

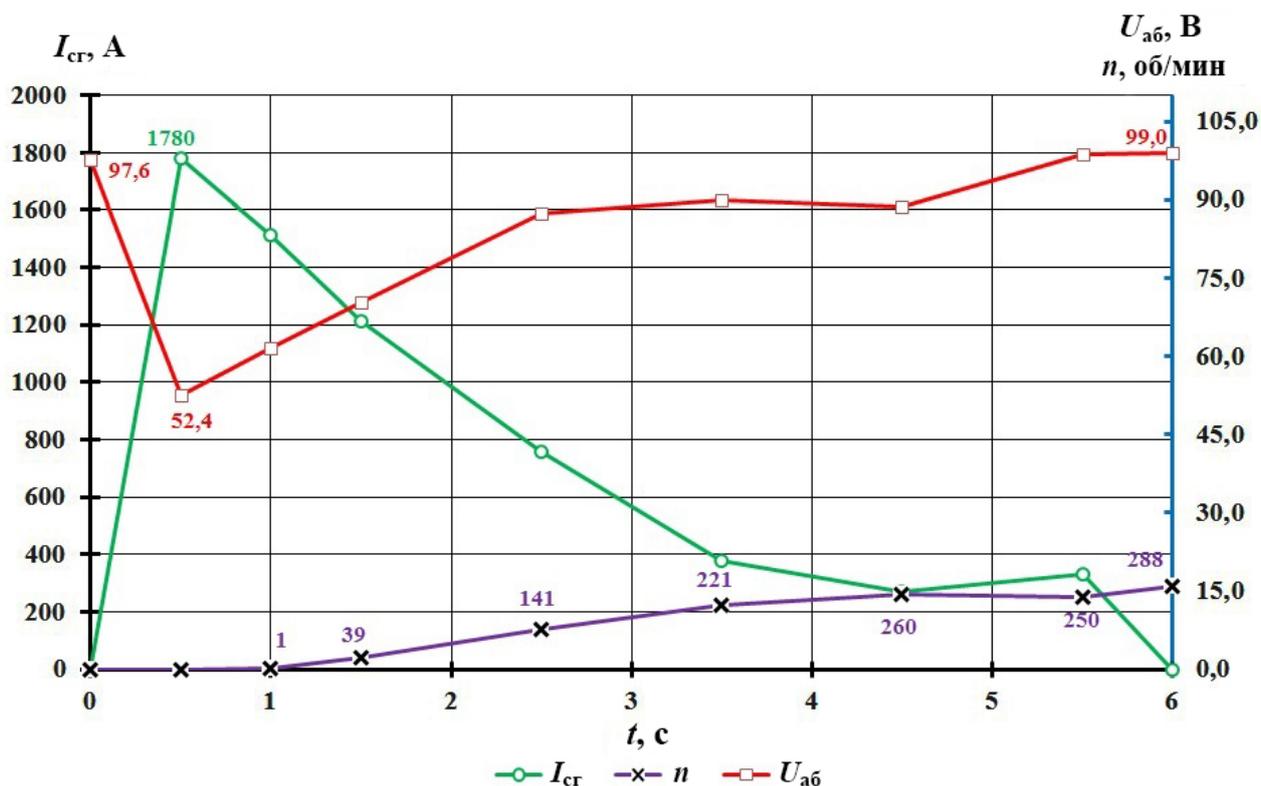


Рис. 7. Осциллограмма запуска дизеля тепловоза ТЭП70БС

Предварительную раскрутку коленчатого вала дизеля на тепловозе ТЭП70БС выполняет стартер-генератор типа 6СГ [9]. Стартер-генераторные системы запуска на сегодняшний день являются одними из наиболее распространенных на железнодорожном транспорте.

В соответствии с рис. 7:

- максимальный ток стартер-генератора при пуске $I_{ст}$ составляет 1780 А (в данном случае ток ограничивается только внутренним сопротивлением батареи и сопротивлением обмоток стартера);
- снижение напряжения аккумуляторной батареи $U_{аб}$ составило 52,4 В, общее падение напряжения — 45,2 В;
- общее время запуска — 6 с.

Данные для построения графиков зависимостей основных параметров запуска двигателя тепловоза 3ТЭ28 получены из архива дисплейного модуля машиниста локомотива. Регистрация основных параметров работы ведется с частотой 1 раз в секунду.

В соответствии с рис. 8:

- максимальный ток пускового преобразователя $I_{пн}$ составляет 509,8 А (кривая тока имеет распределенный характер с плавным нарастанием с увеличением частоты вращения вала синхронной машины);

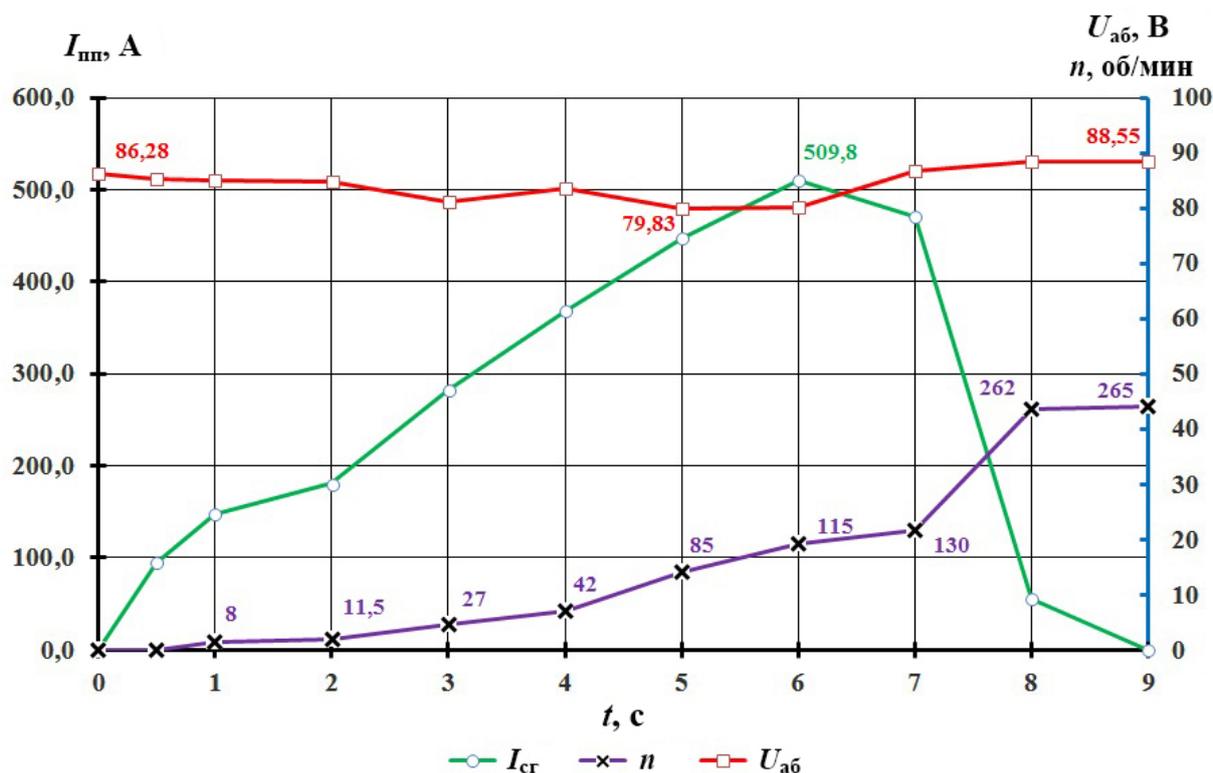


Рис. 8. Осциллограмма запуска дизеля тепловоза 3ТЭ28

– снижение напряжения аккумуляторной батареи при прокрутке дизеля составляет 6,45 В;

– общее время запуска — 9 с (с учетом времени на предварительное позиционирование ротора синхронной машины).

Изменение энергии, потребляемой от аккумуляторной батареи, рассчитано на основании измеренного напряжения источника питания и тока нагрузки и приведено на рис. 9а и 9б.

Площадь фигуры, границы которой сформированы графиком функции $P(t)$ и осью t , численно характеризует общее потребление энергии аккумуляторной батареи при запуске двигателя. Для вычисления площади фигур, приведенных на рис. 9а и 9б, используются численные методы интегрирования, а именно метод трапеций [10].

В результате вычислений получены следующие результаты:

– суммарная мощность, которую потребляет стартер-генератор при запуске, — 261 160 В·А·с;

– суммарная мощность, которую потребляет инверторная система запуска, — 235 331,6 В·А·с.

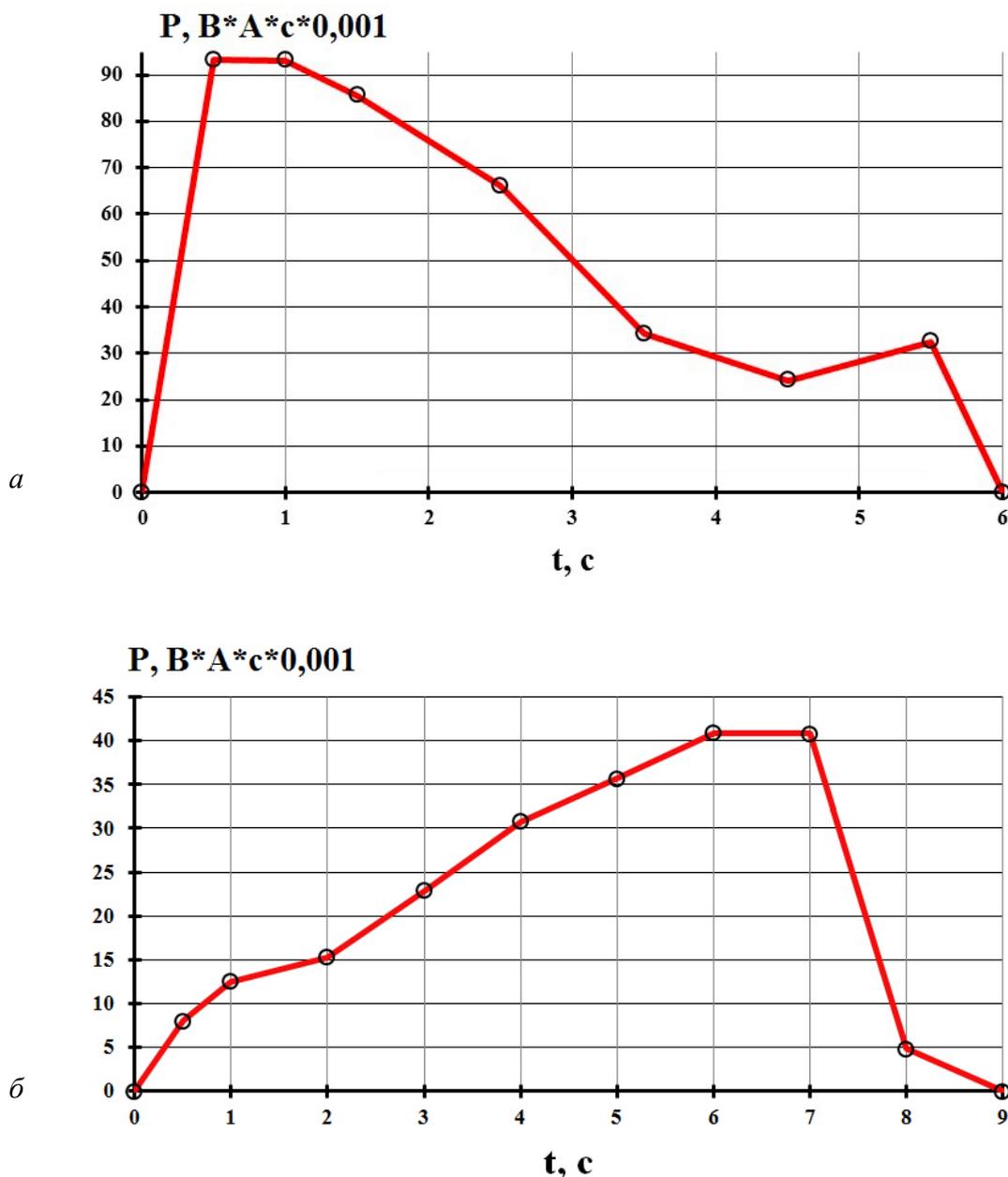


Рис. 9. Диаграммы потребления мощности:
a — стартер-генератором; *b* — инвертором

Таким образом, пренебрегая погрешностью метода численного интегрирования и большим шагом, обусловленным частотой регистрации данных, которые использовались при расчетах, снижение потребления энергии составило 9,88 % при сопоставимых начальных условиях запуска дизельных двигателей различного типа.

Заключение

Во время проведения эксплуатационных испытаний инверторной системы запуска на базе пускового преобразователя ППДГ-1200-200-У2 подтверждено обеспечение надежного запуска дизельного двигателя тепловоза 3ТЭ28. В ходе испытаний выполнялись запуски двигателя при различных начальных параметрах (напряжение батареи, температура моторного масла), при этом неудачных попыток зафиксировано не было.

По результатам анализа данных регистрации выявлено:

- при запуске двигателя в статорной обмотке синхронного генератора формируется трехфазный ток, плавно изменяющийся по амплитуде и частоте и обеспечивающий равномерную раскрутку коленчатого вала дизеля;
- снижение напряжения аккумуляторной батареи при инверторном запуске значительно ниже, чем на тепловозах, оборудованных стартер-генераторной системой запуска;
- потребляемый ток инверторной системы запуска плавно нарастает с увеличением частоты вращения ротора синхронной машины и не имеет ярко выраженных пиковых значений, как при стартерной прокрутке коленчатого вала двигателя, максимальное значение пускового тока значительно ниже при инверторном запуске;
- при раскрутке коленчатого вала двигателя с использованием синхронного агрегата и пускового преобразователя отсутствуют ударные нагрузки на аккумуляторную батарею, при этом потребляется меньше энергии по сравнению со стартер-генераторным запуском силовой установки.

Таким образом, по результатам эксплуатационных испытаний применение системы инверторного запуска может быть распространено и для других серий локомотивов.

Библиографический список

1. РЖД с опережением реализуют второй этап модернизации БАМа и Транссиба. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=207216> (дата обращения: 26.09.2024).
2. ТМХ получил сертификат соответствия на грузовой тепловоз 3ТЭ28. URL: <https://tmholding.ru/media/events/34233.html> (дата обращения: 26.09.2024).
3. Тепловоз магистральный грузовой 3ТЭ28, 2ТЭ28: руководство по эксплуатации СТНР.661112.004РЭ. Часть 1. Основные параметры и характеристики. Брянск: ООО «ТМХ Инжиниринг», 2023. 35 с.
4. Магистральный грузовой тепловоз 3ТЭ28. URL: <https://tmholding.ru/products/gruzovye/magistralnyu-teplovoz-3te28/?ysclid=m1jjqnfqtg261497000> (дата обращения: 26.09.2024).
5. Инжиниринговый центр двигателестроения. URL: <https://tmholding.ru/engineering-center/?ysclid=m1jjuoiobd368813074> (дата обращения: 26.09.2024).

6. Преобразователь пусковой дизель-генератора: руководство по эксплуатации. Коломна: АО «ВНИКТИ», 2021. 43 с.

7. Микроконтроллеры Cortex-M0/M3/M4. URL: <https://mcucpu.ru/index.php/ucontrollers/mcu/113-mikrokontrollery> (дата обращения: 01.10.2024).

8. STM32F405xx, STM32F405xx. Datasheet DS8626, rev. 9. STMicroelectronics, 2020. 203 p.

9. Осин Г.Г. Устройство и эксплуатация тепловозов серии ТЭП70БС (ТЭП70У): учебное пособие. М.: ОАО «РЖД», 2015. 266 с.

10. Коновалова Е. И., Яблокова Л. В. Численные методы математического анализа: учебное пособие. Самара: Изд-во Самарского университета, 2022. 149 с.

Дата поступления: 10.10.2024

Решение о публикации: 28.11.2024

Контактная информация:

ПЛЕШАКОВ Андрей Александрович — заведующий лабораторией СУГЛ ОТВСП;
plechakov@vnikti.com

ЕВСТАФЬЕВ Андрей Михайлович — докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрическая тяга»; elt@pgups.ru

РОЛЛЕ Игорь Александрович — канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электрическая тяга»; igor.rollet@inbox.ru

Study of the inverter system operation of the diesel engine start system during diesel locomotive 3TE28 operation

A. A. Pleshakov¹, A. M. Evstafiev², I. A. Rolle²

¹ JSC "Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock" (JSC "VNIKT1"), 410, Ocyabrskoy Revolutsii st., Kolomna, Moscow region, 140402, Russia

² Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Pleshakov A. A., Evstafiev A. M., Rolle I. A. Study of the inverter system operation of the diesel engine start system during diesel locomotive 3TE28 operation // Bulletin of scientific research results. 2024. Iss. 4. P. 61–77. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2024-04-61-77

Abstract

Purpose: carrying out operational tests of the start converter as a device of the preliminary diesel engine cranking of a diesel locomotive 3TE28 and the analysis of the obtained results. **Methods:** the functioning of the inverter starting system was studied within the framework of its operation as part of a diesel locomotive under different conditions of diesel engine starting (battery residual voltage, oil temperature)

using a measuring complex and a set of additional sensors, as well as accumulation and analysis of the obtained measurement results. **Results:** operational tests of the inverter system of the start power plant on the diesel locomotive 3TE28 in locomotive depot “Tynda-Severnaya” were carried out. The circuit solutions and algorithms of the automatic control system of the inverter are verified. Comparative analysis of energy efficiency of inverter and starter-generator engine start systems is performed. **Practical relevance:** according to the results of operational tests the possibility of application of start converters for reliable diesel engine starts of diesel locomotives equipped with synchronous traction units instead of widespread nowadays starter-generator starting systems is confirmed. The developed technical solution can be duplicated on other series of locomotives, both newly developed and operated as part of their modernization or repair. The data accumulated in operation can be used for further improvement of the control system algorithms of the start converter.

Keywords: diesel locomotive, diesel generator, inverter start system, start converter, synchronous generator, measuring complex, operational tests.

References

1. RZhD s operezheniem realizuyut vtoroj etap modernizacii BAMA i Transsiba. URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=207216> (data obrashcheniya: 26.09.2024). (In Russian)
2. TMH poluchil sertifikat sootvetstviya na gruzovoj teplovoz 3TE28. URL: <https://tmholding.ru/media/events/34233.html> (data obrashcheniya: 26.09.2024). (In Russian)
3. Teplovoz magistral'nyj gruzovoj 3TE28, 2TE28: rukovodstvo po ekspluatácii STNR.661112.004RE. Chast' 1. Osnovnye parametry i harakteristiki. Bryansk: OOO “TMH Inzhiniring”, 2023. 35 s. (In Russian)
4. Magistral'nyj gruzovoj teplovoz 3TE28. URL: <https://tmholding.ru/products/gruzovye/magistralnyy-teplovoz-3te28/?ysclid=m1jjqnfqtg261497000> (data obrashcheniya: 26.09.2024). (In Russian)
5. Inzhiniringovyj centr dvigatelestroeniya. URL: <https://tmholding.ru/engineering-center/?ysclid=m1jyoiobd368813074> (data obrashcheniya: 26.09.2024). (In Russian)
6. Preobrazovatel' puskovoj dizel'-generatora: rukovodstvo po ekspluatácii. Kolomna: AO “VNIKTI”, 2021. 43 s. (In Russian)
7. Mikrokontrollery Cortex-M0/M3/M4. URL: <https://mcucpu.ru/index.php/ucontrollers/mcu/113-mikrokontrollery> (data obrashcheniya: 01.10.2024). (In Russian)
8. STM32F405xx, STM32F405xx. Datasheet DS8626, rev. 9. STMicroelectronics, 2020. 203 p.
9. Osin G.G. Ustrojstvo i ekspluataciya teplovozov serii TEP70BS (TEP70U): uchebnoe posobie. M.: OAO “RZhD”, 2015. 266 s. (In Russian)
10. Konovalova E. I., Yablokova L. V. Chislennye metody matematicheskogo analiza: uchebnoe posobie. Samara: Izd-vo Samarskogo universiteta, 2022. 149 s. (In Russian)

Received: 10.10.2024

Accepted: 28.11.2024

Author's information:

Andrey A. PLESHAKOV — Head of the Laboratory of the SUGL OTVSP; plechakov@vnikti.com

Andrey M. EVSTAFIEV — Dr. Sci. in Engineering, Professor, Head of the “Electric Traction”
Department; elt@pgups.ru

Igor A. ROLLE — PhD in Engineering, Associate Professor, “Electric Traction” Department;
igor.rollet@inbox.ru