

ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ПРИБОРОВ МОНИТОРИНГА И УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ТЯГОВОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЦЕПОЧКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

При проектировании приборов мониторинга и учета электрической энергии для железнодорожных тяговых сетей постоянного тока одной из основных задач является создание источника для их питания. В работе рассмотрены проблемы, возникающие при использовании источников питания от сети собственных нужд тяговой подстанции, выполнен обзор основных технических решений источников, питающихся от тяговой сети, а также предложено оригинальное решение, обладающее большим КПД по сравнению с его прототипом.

Ключевые слова: источник питания, тяговая сеть, прибор мониторинга, прибор учета, высокое входное напряжение.

Введение. В настоящее время на всей сети железных дорог ОАО «РЖД» существует устойчивая тенденция повышения весовых норм поездов [1], приводящая к повышению тяговых нагрузок и, как следствие, к увеличению технических потерь электроэнергии на тягу поездов. Как правило, наибольшее увеличение этих потерь происходит на участках железных дорог, имеющих изначально повышенный уровень удельного расхода и потерь электроэнергии на тягу поездов — на так называемых «узких» местах. Одним из инструментов, позволяющих находить «узкие» места, является автоматизированная система мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса (АСМЭПП) [2], основой работы которой является выполнение синхронных измерений приборами учета электроэнергии на фидерах контактной сети (ФКС) тяговых подстанций (ТП) и электроподвижном составе (ЭПС) с последующей обработкой и анализом [3].

Апробация ключевых технических решений АСМЭПП для постоянного тока была произведена на опытном полигоне Шаля—Подволошная Свердловской железной дороги, где на ФКС всех тяговых подстанций были установлены экспериментальные приборы учета электроэнергии [4], анализ показаний которых позволил локализовать «узкие» участки дороги вплоть до межподстанционной зоны и создать рекомендации по повышению энергетической эффективности системы тягового электропитания [5], а также разработать программные решения для обработки данных [6].

Постановка задачи. Все экспериментальные приборы учета электроэнергии (далее — измерители), установленные в высоковольтных ячейках ФКС тяговых подстанций, были построены по структурной схеме, представленной на рис. 1а. Каждый из-

меритель обеспечивает измерение тягового тока и напряжения с привязкой к сигналам точного времени для обеспечения синхронности измерений, а также производит первичную обработку полученных данных, которые впоследствии передаются на верхний информационный уровень. Прибор соединяется с внешними цепями посредством клемм 1–5 и состоит из микропроцессорного измерителя МИ, измерительного высоковольтного делителя напряжения ИВД, а также источника питания от сети собственных нужд ИПСН. Тяговое напряжение подается на клеммы 1 и 3, понижается ИВД в соответствии с его коэффициентом деления и поступает на входы измерения напряжения МИ. Сигналы с первичного преобразователя тягового тока, в роли которого выступает токовый шунт, поступают на клеммы 1 и 2 и далее на токовые входы МИ. ИПСН обеспечивает питание измерителя, формируя необходимое для него питающее напряжение из переменного напряжения сети собственных нужд тяговой подстанции, обеспечивая необходимую гальваническую развязку.

Несмотря на полную работоспособность, подтвержденную в ходе апробации, выяснилось, что представленная концепция измерителя обладает тремя основными недостатками. Первым из них является зависимость функционирования прибора от наличия напряжения в сети собственных нужд. Если по каким-то причинам это напряжение пропадет, измеритель полностью перестает работать, что приводит к безвозвратной потере данных за весь период отсутствия питающего напряжения. Вторым недостатком является сложность монтажа и обслуживания измерителя. Пять точек подключения, две из которых — питание от сети собственных нужд, требуют прокладки и закрепления дополнительных

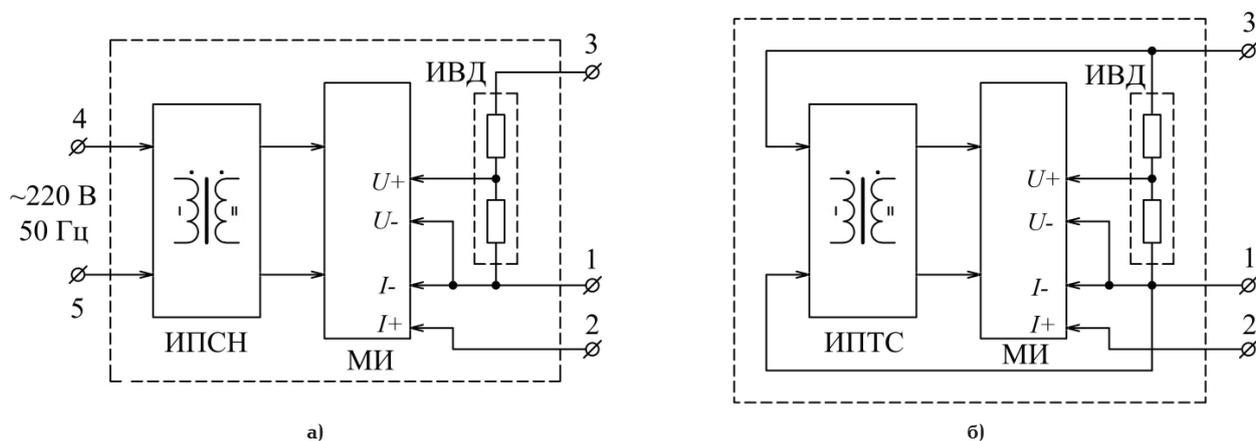


Рис. 1. Структурные схемы измерителей

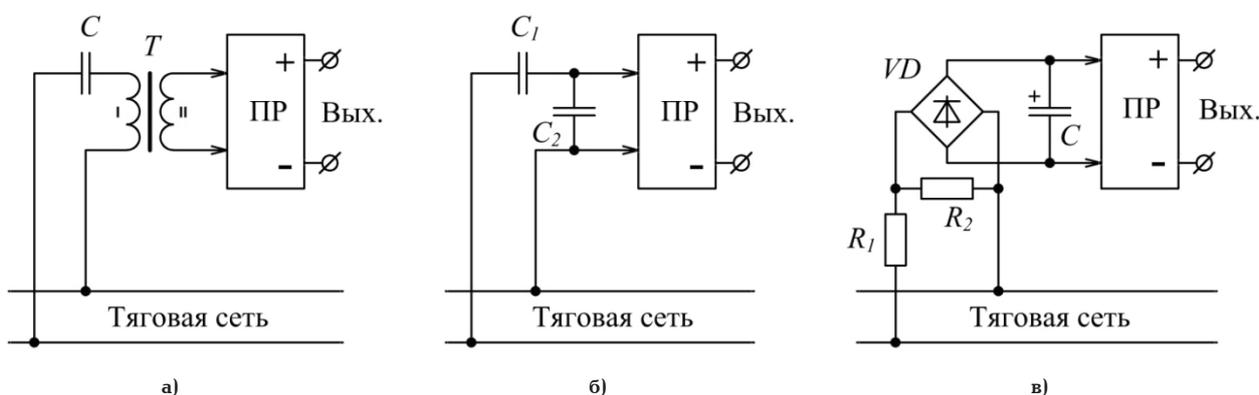


Рис. 2. Основные варианты источников питания от тяговой сети

проводов, которые могут быть случайно повреждены при выполнении регламентных работ в ячейке. Третьим недостатком является необходимость обеспечения ИПСН специфических требований к гальванической изоляции между его входом и выходом. В частности, одним из требований, предъявляемым в ОАО «РЖД» ко всем изоляторам, работающим в цепях тягового напряжения постоянного тока, является способность выдерживать испытательное переменное напряжение промышленной частоты величиной 15 кВ в течение одной минуты. Это значительно превышает требования, предъявляемые к гальванической изоляции типовых трансформаторов и готовых источников питания общего назначения, что исключает их использование в ИПСН. Помимо этого, гальваническая изоляция ИПСН должна иметь минимальную паразитную емкость для исключения прохождения токов помех, возникающих от бросков напряжения в контактной сети, и движущихся в сторону заземления через МИ, ИПСН и сеть собственных нужд. Такие помехи способны не только исказить результаты измерений, но и приводить к сбоям в работе микропроцессорной части. Все это заставляет применять специфические решения [7, 8], позволяющие одновременно реализовать как необходимую электропрочность, так и минимальную паразитную емкость гальванической развязки, но при этом увеличиваются габариты и стоимость ИПСН.

Принципиальное устранение описанных недостатков возможно в случае замены источника питания, работающего от сети собственных нужд, на источник питания, питающийся от тяговой сети

(ИПТС) [9]. Структурная схема усовершенствованного измерителя с ИПТС представлена на рис. 1б. Здесь клеммы 4 и 5 отсутствуют, а входы ИПТС подключены к клеммам 3 и 1 измерителя, на которые подается тяговое напряжение. Поскольку теперь источник питания измерителя получает питание от тягового напряжения, питание прибора никак не зависит от состояния сети собственных нужд. Усовершенствованный измеритель имеет три точки подключения вместо пяти, что уменьшает сложность монтажа и снижает риск случайных повреждений цепей подключения при проведении регламентных работ на соседнем оборудовании ячейки. Отсутствие электрической связи с сетью собственных нужд снимает вопрос об электрической прочности гальванической изоляции ввиду её отсутствия, а также исключает возможность прохождения помех, описанных выше.

Таким образом, использование источника, обеспечивающего питание измерителя от тяговой сети, позволяет решить все три обозначенные выше проблемы и значительно улучшить эксплуатационные характеристики и надежность измерителя, что делает разработку ИПТС актуальной задачей.

Теория. Основная проблема, возникающая при проектировании ИПТС, заключается в высоком входном напряжении, которое на практике может быть даже выше номинальной величины 3,3 кВ [10], что делает невозможным прямое использование радиоэлементов, рассчитанных на работу в промышленных сетях напряжением 0,4 кВ. Это заставляет искать оригинальные подходы к проектированию, отличающиеся от классических. Анализ решений,

известных на настоящий момент, позволяет выделить два основных направления в проектировании ИПТС, заключающихся в использовании либо переменной, либо постоянной составляющей тягового напряжения.

Известно, что при работе многопульсовых выпрямительных преобразователей ТП, не оборудованных емкостными сглаживающими фильтрами, в тяговом напряжении помимо постоянной составляющей присутствуют пульсации напряжения, амплитуда и спектральный состав которых зависят от типа используемых выпрямителей [11]. В решении [12], представленном на рис. 2а, напряжение пульсаций выделяется конденсатором C , далее его уровень понижается трансформатором T , после чего полученное низкое напряжение приводится к требуемому виду преобразователем ПР, построенным по любой известной топологии. При этом гальваническая изоляция может быть реализована как трансформатором T , так и преобразователем ПР. Другим способом выделения напряжения пульсаций и понижения их уровня может быть применение емкостного делителя на входе, что реализовано в конструкции [4], представленной на рис. 2б. Здесь гальваническая развязка может быть реализована только трансформатором в составе ПР.

Использование пульсаций для питания измерителя обладает одним существенным недостатком — в моменты, когда находящийся на межподстанционной зоне ЭПС производит рекуперативное торможение, спектр и амплитуда пульсаций очень сильно меняются, вплоть до почти полного их исчезновения, что с большой вероятностью повлечет за собой невозможность работы питаемого оборудования. Поэтому намого лучшим решением, с точки зрения надежности, является использование постоянной составляющей тягового напряжения. Наиболее эффективным вариантом такого решения из известных на настоящий момент является вариант [13], представленный на рис. 2в. Здесь постоянная составляющая вместе с пульсациями понижается резистивным делителем R_1 и R_2 , выпрямляется диодным мостом VD , далее пульсации отфильтровываются конденсатором C , а полученное напряжение так же поступает на преобразователь ПР, обеспечивающий гальваническую развязку устройства. Диодный мост VD служит для обеспечения работоспособности при любом варианте подключения к тяговой сети, а также защищает ПР от переплюсовки по входу. В оригинальном решении в качестве ПР использован обычный импульсный источник питания с входным напряжением несколько сотен вольт. Это потребовало использования входного делителя с большим коэффициентом деления, что обусловило его сильный нагрев, в особенности резистора R_1 . Большие потери на нагрев существенно снижают КПД такого устройства, что является его основным недостатком, значительно ограничивая его применение на практике.

Единственным возможным путем повышения КПД ИПТС, выполненного по рассматриваемой топологии, является увеличение входного напряжения ПР. В этом случае для передачи той же мощности потребуется меньший входной ток ПР и, как следствие, меньший входной ток всего ИПТС, что совместно с уменьшением коэффициента деления входного делителя позволит существенно снизить потери на его нагрев. Таким образом, для совершенствования решения [13] необходимо по-

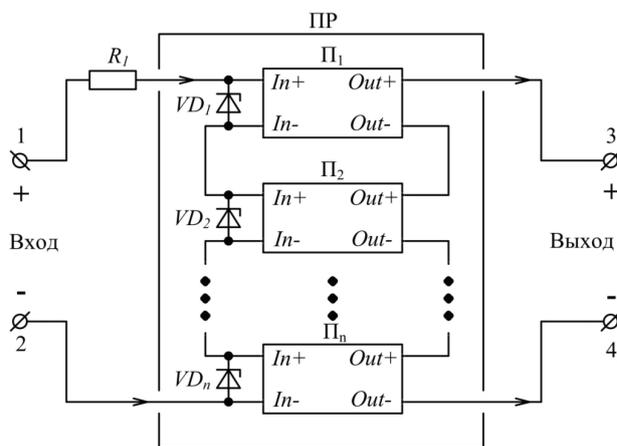


Рис. 3. Источник питания от тяговой сети на основе последовательной цепочки преобразователей напряжения

высить входное напряжение ПР, причем для сохранения низкой стоимости следует воздержаться от применения дорогих высоковольтных полупроводников, отдав предпочтение недорогим распространенным радиоэлементам.

Поставленная задача была решена в устройствах [14–16], разработанных с участием автора. В этих устройствах применено однотипное решение, последняя версия которого представлена на рис. 3. Здесь напряжение тяговой сети поступает на клеммы 1 и 2 и через резистор R_1 подается на преобразователь ПР, состоящий из n гальванически изолированных преобразователей постоянного напряжения в постоянное напряжение $P_1 - P_n$, входы каждого из которых зашунтированы стабилизаторами $VD_1 - VD_n$. Все преобразователи соединены последовательно по входам и выходам так, что крайние входы цепочки преобразователей являются входами ПР, а крайние выходы цепочки преобразователей являются выходами ПР, подключенными к выходным клеммам 3 и 4 устройства. Таким образом, благодаря последовательному соединению низковольтных преобразователей по входу, максимальное входное напряжение ПР является суммой максимальных входных напряжений каждого из преобразователей $P_1 - P_n$ и, в зависимости от их количества, может быть любым в диапазоне от нескольких сотен вольт до нескольких киловольт и выше, что позволяет повысить КПД конструкции по сравнению с ее прототипом на рис. 2в. Стабилизаторы $VD_1 - VD_n$ имеют напряжение стабилизации, равное номинальному входному напряжению $P_1 - P_n$, и выполняют две основные функции. Они симметрируют схему, не допуская чрезмерного повышения входного напряжения на менее нагруженных преобразователях, а также защищают входы $P_1 - P_n$ от превышения входного напряжения на клеммах 1 и 2 устройства. Использование $VD_1 - VD_n$ позволило отказаться от резистора R_2 на схеме рис. 2в, что исключило из схемы габаритный теплонагруженный элемент и упростило конструкцию.

Практика. Для практической проверки предложенного решения был построен экспериментальный ИПТС, содержащий четыре преобразователя, внешний вид которого представлен на рис. 4. Исследования, произведенные с применением высоковольтной лабораторной установки [17], показали полную практическую реализуемость и работоспособность схемы.

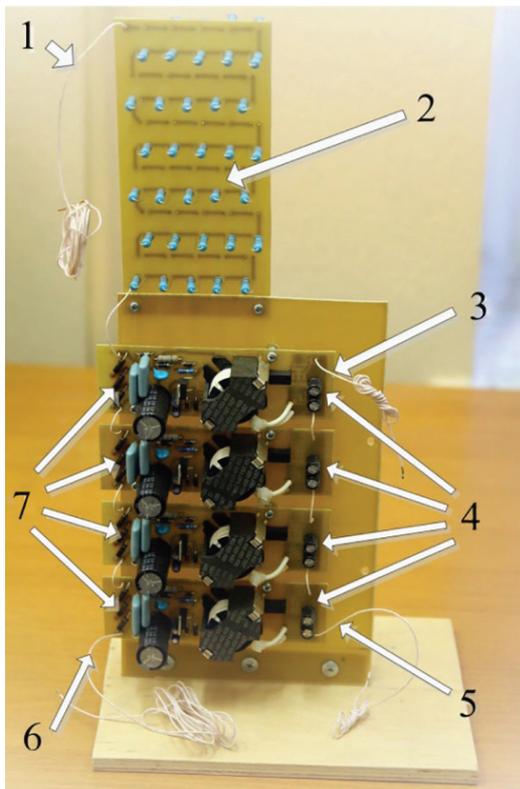


Рис. 4. Экспериментальный источник питания от тяговой сети на четырех преобразователях напряжения:
 1, 6 — входные проводники;
 2 — входной высоковольтный резистор;
 3, 5 — выходные проводники;
 4 — преобразователи напряжения;
 7 — стабилитроны

Заключение. Создание источника питания для приборов мониторинга и учета электроэнергии с питанием от тяговой сети постоянного тока не позволяет использовать стандартные подходы, применяемые для промышленных сетей 0,4 кВ. Это заставляет использовать оригинальные технические решения, одним из которых может быть представленный вариант источника на основе последовательной цепочки преобразователей напряжения, обладающий повышенным КПД по сравнению с его прототипом.

Библиографический список

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. № 2537р. Москва: ОАО «РЖД», 2016. 76 с.
2. Черемисин В. Т., Ушаков С. Ю., Пашков Д. В., Никифоров М. М. Этапы реализации автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса // Железнодорожный транспорт. 2015. № 3. С. 45–49.
3. Каштанов А. Л., Пашков Д. В. Применение синхронных измерений на тяговых подстанциях и электроподвижном составе при анализе эффективности систем автоведения // Научные исследования и их практическое применение. Состояние и пути развития: сб. науч. тр. SWorld. Одесса, 2014. Т. 7, № 3 (36). С. 37–41.
4. Пат. 156167 Российская Федерация, МПК G 01 R 21/00 (2006.01). Счетчик электрической энергии для тяговых подстанций и подвижного состава железнодорожного транспорта с питанием от сети постоянного тока / Чижма С. Н., Лавру-

хин А. А., Малютин А. Г., Окишев А. С., Плотников Ю. В., Чергодаев Ф. В. № 2015100595/28; заявл. 12.01.15; опубл. 10.11.15, Бюл. № 31. 6 с.

5. Черемисин В. Т., Каштанов А. Л., Никифоров М. М. Повышение энергетической эффективности электротяги при внедрении мониторинга электроэнергии на фидерах контактной сети // Транспорт Урала. 2015. № 2 (45). С. 67–70.

6. Никифоров М. М., Плотников Ю. В. Экспериментальная оценка потерь электроэнергии в преобразовательных агрегатах тяговых подстанций постоянного тока за счет применения АСУЭ ФКС // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: материалы Второй Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2016. С. 234–241.

7. Пат. 97881 Российская Федерация, МПК Н 02 М 3/22 (2006.01). Устройство электропитания с высоким напряжением гальванической развязки / Черемисин В. Т., Грицуненко С. С., Хряков А. А. № 2009149550/07; заявл. 30.12.09; опубл. 20.09.10. 4 с.

8. Окишев А. С., Плотников Ю. В. Изолированный источник питания для системы учета электрической энергии в тяговой сети // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2016. С. 112–119.

9. Пат. 165423 Российская Федерация, МПК В 60 М 3/00 (2006.01), Н 02 J 1/00 (2006.01). Блок мониторинга и учета электроэнергии / Черемисин В. Т., Чижма С. Н., Никифоров М. М., Лаврухин А. А., Малютин А. Г., Окишев А. С., Плотников Ю. В., Дегтерева А. В. № 2015151245/11; заявл. 30.11.15; опубл. 20.10.16. 5 с.

10. Квацук В. А., Вильгельм А. С. Мониторинг напряжений в контактной сети на участках постоянного тока в условиях применения рекуперативного торможения // Инновационное развитие железнодорожного транспорта России: материалы Всерос. науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2012. С. 119–128.

11. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость. Москва: УМК МПС, 2002. 638 с. ISBN 5-89035-065-X.

12. Пат. 2298195 Российская Федерация, МПК G 01 R 21/00 (2006.01). Счетчик электрической энергии постоянного тока для подвижного состава железнодорожного транспорта / Ким К. К. № 2005125845/28; заявл. 15.08.05; опубл. 27.04.07, Бюл. № 12. 6 с.

13. Пат. 19327 Российская Федерация, МПК G 01 R 22/00 (2000.01). Счетчик электрической энергии постоянного тока для подвижного состава железнодорожного транспорта / Павлов Л. Н., Корбут А. А., Щедрин Н. Л., Белов Ю. И. № 2001102415/20; заявл. 25.01.01; опубл. 20.08.01. 8 с.

14. Пат. 189408 Российская Федерация, МПК Н 02 М 3/155 (2006.01). Устройство электропитания приборов мониторинга и учета электрической энергии тяговой сети железных дорог постоянного тока / Черемисин В. Т., Плотников Ю. В., Никифоров М. М. № 2019102754; заявл. 10.01.19; опубл. 22.05.19. Бюл. № 15. 5 с.

15. Пат. 188203 Российская Федерация, МПК Н 02 М 3/00 (2006.01). Устройство электропитания приборов мониторинга и учета электрической энергии тяговой сети железных дорог постоянного тока / Никифоров М. М., Плотников Ю. В., Черемисин В. Т. № 2018132891; заявл. 14.09.18; опубл. 03.04.19, Бюл. № 10. 5 с.

16. Пат. 192722 Российская Федерация, МПК Н 02 М 3/155 (2006.01). Устройство электропитания приборов мониторинга электрической энергии тяговой сети железных дорог постоянного тока / Лаврухин А. А., Никифоров М. М., Окишев А. С., Плотников Ю. В., Черемисин В. Т. № 2019121096; заявл. 03.07.19; опубл. 27.09.19, Бюл. 27. 7 с.

17. Плотников Ю. В. Экспериментальная лабораторная установка для исследования блоков питания измерителей па-

раметров тяговой сети постоянного тока 3,3 кВ // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2018. С. 14–20.

ПЛОТНИКОВ Юрий Викторович, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог».

SPIN-код: 4808-6390

Адрес для переписки: ra9mjr@mail.ru

Для цитирования

Плотников Ю. В. Источник питания приборов мониторинга и учета электроэнергии тяговой сети постоянного тока на основе последовательной цепочки преобразователей напряжения // Омский научный вестник. 2021. № 1 (175). 2021. С. 50–54. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-50-54.

Статья поступила в редакцию 30.12.2020 г.

© Ю. В. Плотников