

15. Khalilian M., Mokhtari M., Khazaie J., Nazarpour D., Farsadi M. Distributed Static Series Compensator (DSSC) for Power Flow Control and Inter-Area Oscillations Damping Studies. *ELECO 2011 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 1–4 December, Bursa, Turkey*. Pp. 85–90.

16. Taher S.A., Afsari S.A. Optimal Location and Sizing of DSTATCOM in Distribution Systems by Immune Algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014. Vol. 60. Pp. 34–44.

17. Fajri P., Afsharnia S., Nazarpour D. and Tavallaei M. A. Modeling, Simulation and Group Control of Distributed Static Series Compensators. *American J. of Engineering and Applied Sciences*, 2008. No. 1(4). Pp. 347–357.

18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhnonnesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem [Complex asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk, 2005. 273 p.

19. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Elektromagnitnaya bezopasnost' v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog: modelirovaniye i upravleniye [Electromagnetic safety in power supply systems of railways: modeling and control]. Angarsk, 2018. 382 p.

#### Информация об авторах

**Закарюкин Василий Пантелеймонович** – д-р техн. наук, доцент, ООО «Smart grid», г. Иркутск, e-mail: zakar49@mail.ru

**Крюков Андрей Васильевич** – д-р техн. наук, профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения; Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: and\_kryukov@mail.ru

#### Information about the authors

**Vasilii P. Zakaryukin** – Doctor of Engineering Science, Associate Professor, ООО “Smart grid”, Irkutsk, e-mail: zakar49@mail.ru

**Andrei V. Kryukov** – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University; Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: and\_kryukov@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).92-104

УДК 621.331:625.1

## Сравнительный анализ оборудования уровня процесса для цифровой тяговой подстанции

Е. Ю. Пузина✉

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация*

✉ lena-rus05@mail.ru

#### Резюме

Цифровой подстанцией называется подстанция, в которой организация всех потоков информации при решении задач мониторинга, анализа и управления осуществляется в цифровой форме, а параметры такой передачи определяются единым файлом электронного проекта. В качестве основной среды передачи данных в рамках цифровой подстанции используется локальная вычислительная сеть на базе технологии Ethernet, а в качестве коммуникационных протоколов применяются протоколы, описанные стандартом МЭК 61850. Одной из ключевых особенностей цифровой подстанции является приближение устройств сбора дискретных и аналоговых сигналов и выдачи управляющих воздействий непосредственно к оборудованию с последующей передачей всей информации, необходимой для функционирования комплексов релейной защиты и автоматики и автоматизированной системы управления технологическими процессами подстанций и электрической части станций, в цифровой форме. Благодаря этому достигается сокращение суммарной длины электрических кабелей и вторичных цепей, и, как следствие, происходит снижение вероятности их повреждения и повышение наблюдаемости вторичных систем. В России процесс цифровизации тяговых подстанций электрифицированных железных дорог в настоящее время находится на начальном этапе. Единичные проекты цифровых тяговых подстанций находятся на стадии реализации их первого сегмента, т. е. первого уровня – уровня процесса. Используемое при этом оборудование данного уровня не унифицировано, применяется продукция различных отечественных и зарубежных производителей. Данная работа на базе сравнительного анализа технических показателей, объема возможностей, условий эксплуатации и других характеристик позволяет сформировать перечень наиболее оптимальных видов оборудования отечественного производства уровня процесса для цифровых тяговых подстанций, что создает возможность унифицировать процесс их проектирования и реализации на сети российских железных дорог.

#### Ключевые слова

цифровая тяговая подстанция, автотрансформатор, тяговые трансформаторы, уровень процесса, системы диагностики и мониторинга

#### Для цитирования

Пузина Е. Ю. Сравнительный анализ оборудования уровня процесса для цифровой тяговой подстанции // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 92–104. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).92-104

#### Информация о статье

поступила в редакцию: 20.02.2021, поступила после рецензирования: 08.03.2021, принята к публикации: 19.03.2021

## Comparative analysis of the technological equipment for the digital traction substation

E. Yu. Puzina ✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ lena-rus05@mail.ru

### Abstract

A digital substation is a substation in which all information flows while solving problems of monitoring, analysis and control are organized digitally, and the parameters of such transfer are determined by the single file of a digital project. A local computational network based on the Ethernet technology is used as the main means of data transfer within a digital substation, and protocols described by the MEK 61850 standard are applied as communication protocols. One of the key features of the digital substation is the closeness of the devices for collecting discrete and analog signals and issuing control actions directly to the equipment with the subsequent transfer of all information necessary for the functioning of relay protection and automation complexes and an automated control system for production processes of substations and electrical parts of stations, in digital form. Due to this, a reduction in the total length of electrical cables and secondary circuits is achieved, and, as a consequence, there is a decrease in the likelihood of their damage and an increase in the observability of secondary systems. In Russia, the process of digitalization of traction substations of electrified railways is currently at its initial stage. Single projects of digital traction substations are at the stage of implementation of their first segment, i.e. the first level – the process level. The equipment of this level used for this is not unified, products of various domestic and foreign manufacturers are used. This work, based on a comparative analysis of technical indicators, scope of capabilities, operating conditions and other characteristics, allows forming a list of the most optimal types of the equipment of domestic production at the process level for digital traction substations. This makes it possible to unify the process of their design and implementation on the network of Russian railways.

### Keywords

digital traction substation, autotransformer, traction transformers, process level, systems of diagnostics and monitoring

### For citation

Puzina E. Yu. Sravnitel'nyi analiz oborudovaniya urovnya protsessa dlya tsifrovoy tyagovoy podstantsii [Comparative analysis of the technological equipment for the digital traction substation].. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2021, No. 2 (70), pp. 92–104. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).92-104

### Article info

Received: 20.02.2021, Revised: 08.03.2021, Accepted: 19.03.2021

### Введение

Железнодорожный транспорт является одной из наиболее важных транспортных отраслей России, поскольку объем перевозимых железными дорогами грузов достиг 87 % от общего объема грузоперевозок, выполненных в стране в 2020 г. С повышением объема перевозок на железных дорогах повышаются и требования к надежности устройств их электрооборудования [1], в частности к тяговым подстанциям. Поэтому при проектировании новых и реконструкции действующих тяговых подстанций целесообразно применять современное надежное и, вместе с тем, малообслуживаемое оборудование, что является одним из трендов современной экономики [2, 3].

В настоящее время настоятельной необходимостью становится цифровизация экономики в России. И сегодня все чаще можно услышать про технологию «Цифровая подстанция». Так, стали широко применяться цифровые устройства защиты и автоматизации, цифровое измерительное оборудование. Появились новые международные стандарты, позволяющие решить задачи управления электрообору-

дованием, а также реализовать необходимые методы диагностики и мониторинга электрооборудования тяговых подстанций [4]. Эти тенденции позволяют перейти к реализации цифровых тяговых подстанций (ЦТП) в России.

### Описание проблемной ситуации и постановка задачи

Опыт использования и проектирования цифровых подстанций получен во Франции, в которой с 2016 г. эксплуатируется цифровая подстанция 225/90/20 кВ. Проекты подобных подстанций имеются в Дании, Канаде, Мексике, а в Китае в 2010 г. реализовано 67 подстанций с высоким уровнем автоматизации управления.

В Белоруссии реализовали цифровую подстанцию «Приречная» уровнем напряжения 110 кВ и получили ряд преимуществ:

- сокращение затрат на монтаж и исключение ошибок при монтаже;
- использование одной волоконно-оптической линии, вместо множества кабельных;

- непрерывная самодиагностика системы;
- снижение вероятности ошибок при эксплуатации.

В 2017 г. в Красноярском крае ввели в эксплуатацию цифровую подстанцию для электроснабжения малоэтажного строительства района и для электроснабжения крупного торгового центра. Это позволило повысить надежность системы электроснабжения близлежащих районов и снизить затраты на обслуживание подстанции.

Также в России есть примеры цифровых подстанций Медведковская (г. Москва, Сколково), Тобол (г. Тобольск), Южная (г. Череповец). При этом для цифровизации названных подстанций используется оборудование различных производителей, соответственно единого, унифицированного подхода к выбору оборудования для цифровизации подстанций в нашей стране в данное время нет.

На электрифицированных железных дорогах России процесс цифровизации тяговых подстанций только начинается. Заявлены цифровыми тяговые подстанции Владимир (Горьковская железная дорога), Инская (Западно-Сибирская железная дорога). Однако, в настоящее время эти подстанции только лишь оснащены системами диагностики и мониторинга части электрооборудования. Поэтому актуальной задачей в области электрифицированного железнодорожного транспорта является выработка единого подхода к формированию требований к структуре, составу, оснащенности лучшим отечественным оборудованием ЦТП.

### Структура цифровой тяговой подстанции

ЦТП – это тяговая подстанция с высоким уровнем автоматизации управления, на которой процессы информационного обмена между оборудованием,

а также управление работой осуществляются передачей данных и команд управления по цифровым каналам связи на основе стандартов серии МЭК 61850 [5–7].

Структура ЦТП строится на трех основных уровнях: полевой (уровень процесса); средний (уровень присоединения); верхний (уровень подстанции) [7] (рис. 1).

Уровень подстанции состоит из основных систем управления подстанцией, программно-технического комплекса (ПТК) и человеко-машинных интерфейсов. Как правило, оборудование уровня подстанции включает в себя следующие устройства:

- сервер управления функционалом цифровой тяговой подстанции (ПТК-сервер);
- сервер управления подстанционным оборудованием (SCADA-сервер);
- сервер контроля и связи (сервер телемеханизации, станционный контроллер связи и управления);
- сервер сбора, хранения и передачи информации;
- автоматизированное рабочее место персонала (человеко-машинный интерфейс);
- сервер точного времени;
- средства гарантированного питания.

Это оборудование объединяется в единую технологическую сеть. Серверы организуются в виде виртуальных систем на основе серверного отказоустойчивого кластера. Сетевое оборудование в свою очередь состоит из коммутаторов, сетевых шлюзов, межсетевых экранов и конвертеров протоколов.

Уровень присоединения состоит из оборудования и программного обеспечения, которое служит для концентрации и унификации разнородных информационных потоков с нижнего уровня цифровой тяговой подстанции, их обработки и взаимодействия

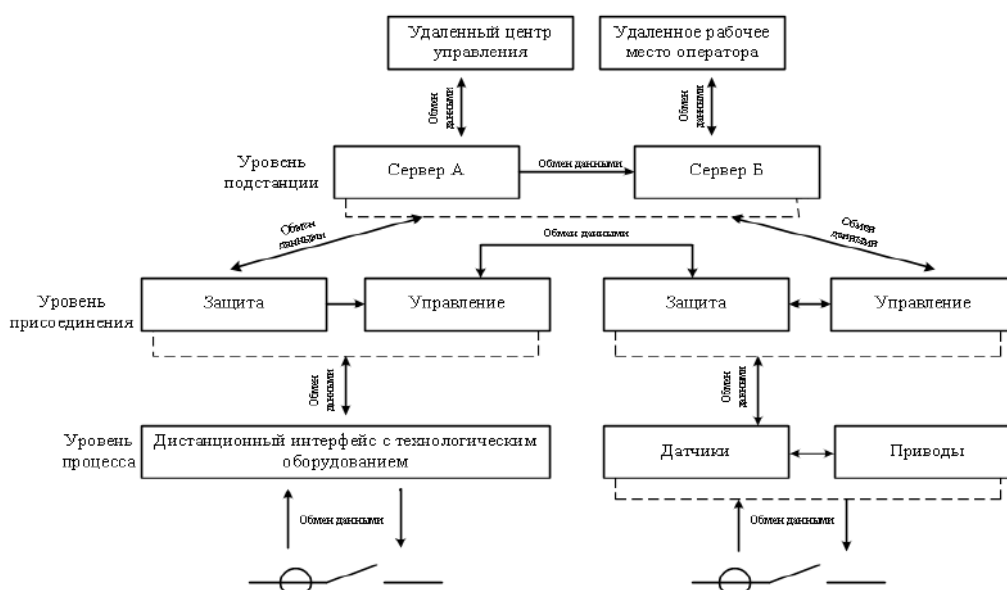


Рис. 1. Структурная схема цифровой тяговой подстанции  
Fig.1. Structural diagram of a digital traction substation

с вышестоящими уровнями автоматизации.

Оборудование уровня присоединения состоит из следующих устройств:

- устройства защиты и аварийной автоматики;
- выносные шкафы управления;
- устройства сбора диагностической информации;
- измерительные преобразователи и модули;
- устройства учета и контроля электроэнергии.

Уровень процесса включает в себя источники аналоговой и дискретной информации о состоянии первичного процесса объекта автоматизации, датчики и метки, устанавливаемые на территории подстанции, а также резервируемую сетевую инфраструктуру доставки цифровых сигналов на средний уровень (коммутаторы шины процесса). В качестве источников первичной информации применяются цифровые трансформаторы тока и напряжения. В качестве источников дискретной информации применяются специализированные преобразователи дискретных сигналов, либо коммутационные аппараты, оснащенные цифровым интерфейсом.

К оборудованию уровня процесса относятся:

- преобразователи и датчики первичной информации, включая электронные трансформаторы тока и электронные трансформаторы напряжения, преобразователи аналоговых и дискретных сигналов;
- выносные (устанавливаемые в местах размещения первичного оборудования) цифровые контроллеры.

Оборудование процесса служит для сбора, преобразования в цифровой вид и передачи на уровень присоединения информации о работе основного оборудования подстанции, включая дискретные значения и непрерывно меняющиеся сигналы, с заданной точностью и детализацией.

Устройства уровня процесса должны предоставлять общий интерфейс для взаимодействия с основным оборудованием уровня присоединения и функциональных подсистем.

### Сравнительный анализ оборудования уровня процесса для цифровизации тяговой подстанции

На ЦТП оборудование в целях цифровизации необходимо оснастить системами мониторинга и диагностики (СМД). Также необходимо обеспечить дистанционное управление коммутационными аппаратами, разъединителями и регулирование напряжения (РПН) силового трансформатора.

Информационный обмен данными между устройствами диагностики, микропроцессорными терминалами и другими интеллектуальными устройствами необходимо реализовать по международному стандарту МЭК 61850 [7].

Для уровня процесса ЦТП должны быть выбраны необходимые измерительные трансформаторы, а также СМД, преобразователи и датчики, которые, в

свою очередь, будут взаимодействовать с первичным оборудованием. В целях поддержки отечественного производителя в данной работе выполнен сравнительный анализ оборудования уровня процесса ЦТП, выпускаемого отечественными производителями.

#### Измерительные трансформаторы

На данный момент производители предлагают вместо отдельных цифровых трансформаторов тока (ТТ) и цифровых трансформаторов напряжения (ТН) комбинированное оборудование, включающее в себя функции как ТТ, так и ТН. Такой тип оборудования удобен тем, что требует меньше эксплуатационных затрат.

Комбинированные цифровые ТТ и ТН (ЦТТН) состоят из первичного преобразователя силы тока, электронных блоков, изоляции в виде силиконовой рубашки (рис. 2).

Измеренные с помощью инновационной датчиковой системы, состоящей из пояса Роговского, магнитотранзисторного преобразователя, безиндуктивного шунта, трансформатора тока с нанокристаллическим магнитопроводом и резистивного делителя напряжения, значения тока и напряжения оцифровываются непосредственно на первичном проводе и передаются по оптоволокну на низковольтную сторону, где производится их обработка и упаковка в соответствии с протоколом.

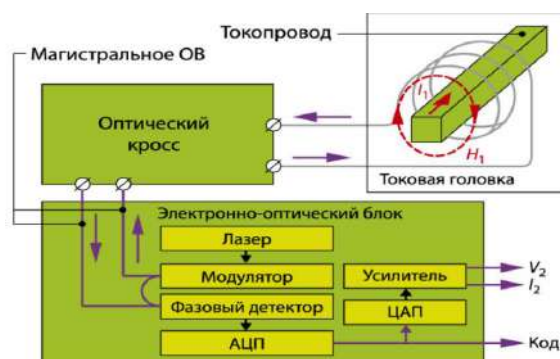


Рис. 2. Структурная схема цифрового трансформатора тока и напряжения

Fig. 2. Structural diagram of digital current and voltage transformer

По сравнению с традиционными измерительными трансформаторами, цифровые трансформаторы имеют ряд преимуществ:

- обладают высокой точностью измерения;
- не подвержены влиянию электромагнитных полей за счет использования безиндуктивного преобразователя напряжения;
- отсутствие потерь и искажений при передаче информации;
- взрывобезопасны из-за отсутствия масла и газа;
- улучшенные массогабаритные показатели;

– возможность получать сигнал сразу в цифровом виде.

Преимущества ЦТТН перед отдельными цифровыми трансформаторами тока и напряжения:

- устойчивость к температурным и вибрационным воздействиям;
- широкий диапазон измерений за счет отсутствия в преобразовании искусственной модуляции;
- повреждение вторичной оптоволоконной цепи не приводит к необходимости замены всего трансформатора;
- меньше стоимость и ниже эксплуатационные расходы.

Результаты сравнения ЦТТН отечественных производителей по их характеристикам приведены далее (табл. 1).

По приведенным данным (см. табл. 1) видим, что ЦТТН производства ООО НПО «Цифровые измерительные трансформаторы» отличаются большим межповерочным интервалом и меньшей массой и, соответственно, могут быть рекомендованы к применению на ЦТП в распределительных устройствах 110 кВ и ниже.

*Система мониторинга и диагностики силовых трансформаторов и автотрансформаторов*

Наиболее ответственными элементами системы тягового электроснабжения на ЦТП являются автотрансформаторы (АТ) при их наличии и тяговые трансформаторы. Для того чтобы избежать ситуаций с выходом из строя этого оборудования и выполнить оценку остаточного ресурса, предлагается использовать системы диагностики и мониторинга тягового трансформатора и АТ [8–16].

Система мониторинга и диагностики предназначена для следующих процессов:

- непрерывного измерения, регистрации и отображения параметров трансформатора в нормальных, предаварийных и аварийных режимах;
- определения технического состояния трансформатора и прогнозирования его остаточного ресурса по полученным данным на основе математических моделей;
- интеграции перечисленных функций в автоматизированную систему управления тяговыми под-

станциями (АСУ ТП) объекта энергосистемы [17, 18].

СМД состоит из следующих элементов:

- датчиков и измерительного оборудования, позволяющих непосредственно измерять текущие параметры трансформатора в контрольных точках;
- контроллера и модулей сбора и передачи данных, обеспечивающих сбор измеренных значений от датчиков и оборудования, сигналов от систем трансформатора и передачу этой информации на главный модуль;
- систем управления охлаждением;
- ПТК, производящего прием, обработку и регистрацию данных от трансформаторов.

Параметры, которые должна контролировать СМД на цифровой тяговой подстанции:

- изоляция высоковольтных вводов;
- температура масла и обмоток трансформатора;
- старение изоляции;
- состояние РПН;
- содержание влаги в масле;
- частичные разряды в изоляции;
- наличие растворенных газов в масле;
- работу системы охлаждения;
- вибрацию в баке трансформатора.

Для фиксации указанных параметров необходимо использовать следующие датчики:

- датчик анализа растворенных газов в масле, который предназначен для оперативного контроля и мониторинга параметров растворенных газов в масле бака трансформатора;
- датчик контроля технического состояния РПН (контролирует количество коммутаций, мощности приводного двигателя, определяет положение моста по токам фаз, оценивает состояние контактов);
- датчик регистрации частичных разрядов (ЧР), устанавливается в бак трансформатора (регистрация ЧР производится в сверхвысокочастотном диапазоне частот, что дает возможность выявлять дефекты в изоляции на ранних стадиях);
- датчик тока обмоток трансформатора позволяет производить расчет температуры наиболее нагретой точки (ННТ) обмотки (расчет ННТ выполняется в соответствии с рекомендациями, путем решения дифференциальных уравнений теплопереноса при

**Таблица 1.** Технические данные цифровых трансформаторов тока и напряжения

**Table 1.** Technical data of digital current and voltage transformers

Показатель	Производитель	
	ООО НПО «Цифровые измерительные трансформаторы»	АО «Профотек»
Номинальное напряжение, кВ	6–110 кВ	110–220 кВ
Номинальный ток, А	10–4 000 А	200–4 000 А
Классы точности	0,2; 0,2S; 0,5; 1; 3; 5; 5TR; 5P; 10P	0,2S; 5TR; 0,2; 3P
Масса, не более, кг	5 (10 кВ), 30 (35 кВ), 50 (110кВ), 75 (220 кВ)	От 65 до 120
Межповерочный интервал, лет	8	5
Интерфейс	МЭК 61850-9-2	МЭК 61850-9-2
Погрешность, %	0,03 %	0,03 %

произвольном изменении во времени тока нагрузки и температуры окружающей среды, что наиболее подходит для непрерывного мониторинга трансформатора в реальном времени) [19–21];

– датчик температуры устанавливается также в бак трансформатора, позволяет измерять температуру масла в баке трансформатора, оценивать эффективность работы системы охлаждения;

– датчик контроля вибрации, устанавливается на поверхности бака трансформатора (на основании сравнения вибрационных процессов в трансформаторе, регистрируемых в режимах, близких к режиму холостого хода и нагрузки, производится оценка качества пресовки активных элементов трансформатора – стали и обмоток).

Для выбора СМД сравним системы различных отечественных производителей (табл. 2).

По представленным данным (см. табл. 2) можно сделать вывод о том, что СМД производства ООО «Dimrus» (TDM) поддерживает протокол передачи

данных МЭК 61850, имеет более обширный набор контролируемых датчиками параметров, не включенных в состав других СМД (датчики вибрации и ЧР) и более широкий диапазон рабочих температур.

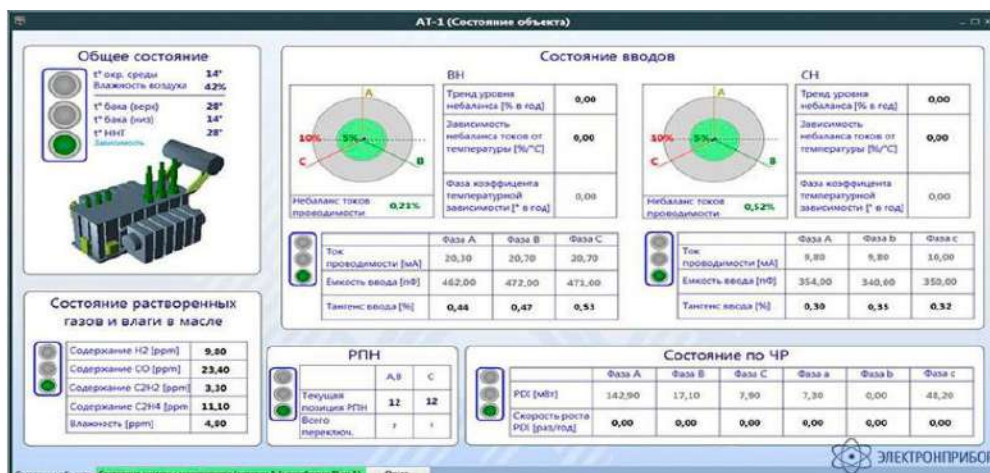
СМД TDM используют в том случае, когда необходимо создать систему мониторинга ответственных и мощных трансформаторов [22]. Отличительной особенностью данной системы является наличие датчика, интегрированного в бак трансформатора, он позволяет контролировать влагосодержание в масле, температуру, вибрацию и ЧР.

Оценка состояния оборудования производится на основании использования двух видов диагностики: параметрической, основанной на анализе нормируемых параметров, и экспертной, основанной на использовании математических моделей.

Модули системы программно интегрируются в единую систему АСУ ТП подстанции по протоколу МЭК 61850. Система обеспечивается программным обеспечением INVA (рис. 3), которое позволяет

**Таблица 2.** Сравнение характеристик системы мониторинга и диагностики  
**Table 2.** Comparison of the characteristics of the monitoring and diagnostic system

Показатель	Производитель		
	ООО «Dimrus» (TDM)	НТЦ «Арго»	ООО «Парма»
Диапазон рабочих температур, °С	От –55 до +60	От –40 до +50	От –40 до +55
Интерфейс	МЭК 61850, RS-485	RS-485	RS-485, RS-232
Рабочее напряжение трансформатора, кВ	110–500	110–500	110–750
Контроль вводов	+	–	+
Частичный разряд	+	–	+
Регулирование напряжения	+	–	+
Система охлаждения	+	+	+
Анализ газов и влаги	+	+	+
Температура масла и обмоток	+	+	+
Состояние изоляции	+	+	+
Вибрация	+	–	–
Использование режима on-line	+	+	+



**Рис. 3.** Программное обеспечение системы мониторинга  
**Fig. 3.** Monitoring system software



обеспечить работу со всеми системами мониторинга фирмы «Dimrus».

По итогам работы алгоритмов в программе INVA рассчитывается единый коэффициент текущего технического состояния трансформатора. Этот коэффициент комплексно отражает состояние трансформатора. Индекс технического состояния оборудования описывает его в условиях полного жизненного цикла оборудования, который обычно включает в себя несколько межремонтных периодов.

*Система диагностики и мониторинга трансформаторов собственных нужд*

Также к наиболее ответственным видам оборудования тяговой подстанции относятся трансформаторы собственных нужд (ТСН). Система диагностики и мониторинга трансформаторов собственных нужд (СМД ТСН) применяется для контроля следующих параметров:

- регистрация и анализ температурных режимов работы трансформатора;
- контроль влагосодержания в масле бака трансформатора;
- контроль влагосодержания в твердой изоляции обмоток трансформатора;
- регистрация и анализ разрядных процессов внутри бака трансформатора;
- контроль технического состояния конструкции трансформатора по параметрам вибрации;
- контроль уровня масла в баке трансформатора по принципу защитного реле.

Конструктивно прибор системы мониторинга TDM-35 представляет собой единый металлический корпус (рис. 4). В верхней части в отдельном герметичном металлическом корпусе располагается электронная часть всей системы мониторинга. В нижней части корпуса находятся первичные датчики. Смонтировать СМД можно как в штатную горловину для заливки масла, так и с помощью переходного фланца, устанавливаемого на любой крышке бака

Датчики для регистрации параметров трансформатора конструктивно объединены в единый модуль, который вводится внутрь бака трансформатора через верхнюю крышку.

Результаты работы системы:

- информация о текущем техническом состоянии

контролируемого трансформатора в целом и его отдельных подсистем;

- перечень тревожных и предаварийных превышений контролируемых параметров, выявленных системой мониторинга за выбранный пользователем период времени;

– расчет температуры наиболее нагретой точки обмотки трансформатора, определение скорости старения изоляции обмоток;

– оценка эффективности работы системы охлаждения, учитывающая возникновение внутри бака трансформатора дополнительных зон нагрева;

– список всех диагностированных экспертной системой признаков дефектных состояний трансформатора с оценкой степени их опасности.

Сравнение СМД ТСН по характеристикам показано далее (табл. 3). Видим, что СМД TDM-35 фирмы «Dimrus» отличается тем, что имеет возможность работать в более широком диапазоне температур, также поддерживает протокол передачи данных МЭК-61850 и подвергает контролю практически все системы ТСН.



**Рис. 4.** Модуль датчиков системы TDM-35  
**Fig.4.** Module of sensors of the system TDM-35

*Система диагностики и оценки технического состояния комплектных распределительных устройств*

В состав ячейки ввода и фидера комплектных распределительных устройств (КРУ) входят выключо-

**Таблица 3.** Характеристики системы мониторинга и диагностики трансформаторов собственных нужд  
**Table 3.** Characteristics of the monitoring and diagnostics system for auxiliary transformers

Показатель	Производитель	
	ООО «Dimrus» (TDM-35)	ООО «Эма»
Диапазон рабочих температур, °С	От -55 до +60	От -40 до +50
Интерфейс	МЭК 61850, RS-485	RS-485
Рабочее напряжение трансформатора, кВ	6–35	10–110
Система охлаждения	+	–
Частичный разряд	+	+
Вибрация	+	–
Влагосодержание	+	–

чатель, трансформатор тока, шины и отходящие кабельные линии. Для того чтобы производить диагностику и оценку технического состояния ячейки, необходимо использовать несколько различных СМД по каждому виду оборудования. Единственным отечественным производителем, который предлагает комплексную систему диагностики и мониторинга КРУ типа СМД ВДМ, позволяющую контролировать сразу все оборудование ячейки по многим параметрам, является ООО «Dimrus».

Необходимый функционал СМД КРУ:

- осуществление контроля технического состояния выключателей, расположенных в ячейках КРУ;
- возможность проводить оценку изменения изоляции КРУ;
- контроль рабочих температур шин и токопроводов;
- проведение оценки технического состояния отходящих кабельных линий.

Система состоит из набора технических модулей и датчиков:

- датчик ВДМ/РД, предназначенный для контроля состояния высоковольтной изоляции в ячейках КРУ и контроля кабельных линий (КЛ) по частичным разрядам;
- датчик ВДМ/СВ, предназначенный для мониторинга и диагностики высоковольтных выключателей в ячейках КРУ [23];
- датчик ВДМ/Т для контроля температуры шин КРУ и контактов выключателя.

Главный модуль системы осуществляет оперативный контроль технического состояния выключателей, расположенных в КРУ, оценивает изменение состояния изоляции КРУ, контролирует температуру шин и токопроводов и оценивает техническое состояние отходящих КЛ.

Для регистрации графиков DC токов соленоидов управления и нагрузочных AC токов выключателя используются бесконтактный датчик тока марки CSS (рис. 5). Это накладные AC/DC-датчики с изолированным корпусом, при установке которых не нужно разрывать цепи управления выключателем.



Рис. 5. Датчик тока  
Fig. 5. Current sensor

Работа экспертной программы основана на анализе распределения зарегистрированных импульсов частичных разрядов относительно фазы синусоиды питающей сети. В результате определяется тип дефекта, степень развития и его опасности для дальнейшей эксплуатации КРУ.

*Система мониторинга технического состояния линии электропередачи*

Система мониторинга технического состояния линии электропередачи (СМД ЛЭП) должна контролировать следующие параметры:

- наличие гололеда на проводах;
- температурные изменения проводов;
- состояние подвесных изоляторов;
- перенапряжения в защищаемой линии;
- определение места повреждения проводов;
- контролирование стрелы провеса проводов и натяжения проводов.

Структурная схема СМД марки DiLin приведена (рис. 6).

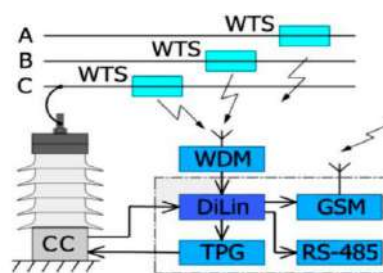


Рис. 6. Структурная схема системы мониторинга линии электропередачи  
Fig. 6. Structural diagram of the power transmission line monitoring system

Результаты работы системы:

- информация о техническом состоянии ЛЭП;
- определение стрелы провеса и сравнение полученного значения с допустимым;
- определение полной температурной картины проводов.

Основные диагностические методы, применяемые в СМД DiLin:

- волновой метод, контролирующий скорость и затухание волны электромагнитного поля в линии (для контроля этих параметров в работающую линию подаются импульсы от тестового генератора);
- метод анализа рефлектограмм, основан на регистрации импульсов, отраженных от участков ЛЭП;
- мониторинг разрядной активности в линии, позволяющий контролировать практически все виды импульсных процессов;
- локация мест возникновения дефектов в линии по разнице времени прихода импульсов от разрядов к разным концам линии;
- оперативный прямой контроль температуры проводов ЛЭП с использованием беспроводных



датчиков температуры.

Сравнение СМД ЛЭП отечественных производителей по характеристикам и контролируемым параметрам приведено (табл. 4).

По данным (табл. 4) можно сделать вывод о том, что СМД марки DiLin ООО «Dimrus» имеет более высокий срок службы батареи, широкий диапазон рабочих температур и параметров, также имеется контроль состояния изоляции подвесных изоляторов.

*Система диагностики и мониторинга ограничителя перенапряжения нелинейного*

Система диагностики и мониторинга ограничителя перенапряжения нелинейного (ОПН) контролирует следующие его параметры:

- величина тока утечки;
- регистрация энергии импульсов.

Результаты работы системы:

- информация о текущем техническом состоянии контролируемого ОПН;
- определение остаточного ресурса.

Беспроводной интеллектуальный датчик марки ОПН-Датчик предназначен для оперативного контроля состояния высоковольтных ограничителей перенапряжений. Датчик устанавливается в разрыв цепи заземления высоковольтного ОПН и измеряет ток утечки в рабочих режимах. Состоит из датчика

тока утечки ОПН, установленного на проходной шпильке, универсальной электронной платы и встроенной батареи.

При помощи встроенного микропроцессора в датчике рассчитывается действующее значение тока утечки, разделяются его емкостная и активная составляющие. Для проведения диагностики и оценки технического состояния ОПН в датчике рассчитываются амплитуды первой, третьей и пятой гармоник в общем токе утечки. В тех случаях, когда важным является знание остаточного ресурса ОПН необходимо использовать ОПН-Датчик-2.

Сравнение СМД по техническим параметрам показано далее (табл. 5).

Из данных (см. табл. 5) видно, что СМД от ООО «Dimrus» имеет больший срок службы, шире диапазон температур работы и меньшую массу. Также она позволяет определять остаточный ресурс ОПН за счет суммирования энергии импульсов, прошедших через устройство.

*Система мониторинга и диагностики цепей оперативного тока*

Система мониторинга и диагностики цепей оперативного тока (СМОТ) контролирует следующие параметры: изоляцию; напряжение и пульсации; значения тока; напряжение и температуры АБ; выпрями-

**Таблица 4.** Характеристики системы мониторинга и диагностики линий электропередачи  
**Table 4.** Characteristics of the monitoring and diagnostics system for power transmission lines

Показатель	Производитель	
	ООО «Dimrus» (DiLin)	«Nexans»
Диапазон рабочих температур, °С	От –55 до +50	От –40 до +50
Интерфейс	МЭК 61850, RS-485, GSM	GSM, RS-485
Напряжение контролируемой линии электропередачи, кВ	От 6	35–500
Срок службы (замены батареи), лет	20	5
Определение наличия гололеда	+	+
Натяжение	+	+
Температура провода	+	+
Ток в проводе	+	+
Контроль изоляции	+	–
Перенапряжения	+	–
Температура окружающего воздуха	–	+

**Таблица 5.** Сравнение характеристик и параметров системы мониторинга и диагностики ограничителя перенапряжения нелинейного

**Table 5.** Comparison of characteristics and parameters of the monitoring system and diagnostics of the nonlinear surge suppressor

Показатель	Производитель	
	ООО «Dimrus»	ОАО «Позитрон»
Диапазон рабочих температур, °С	От –40 до +60	От –40 до +50
Интерфейс	МЭК 61850, RS-485, GSM	GSM, RS-485
Напряжение контролируемой линии электропередачи, кВ	110–500	110–750
Срок службы (замены батареи), лет	От 20	Не менее 5
Расстояние от датчика до приемника, м	До 120	До 1000
Масса, гр	400	800
Контроль тока утечки	+	+
Суммирование энергии импульсов	+	–

тельный аппарат; положение выключателей [24].

Результаты работы системы:

- измерение и выдача показаний параметров сопротивления изоляции;
- формирование сигналов с выдачей сигнализации в виде «сухих контактов»;
- формирование архива событий, запись значений тока приводов;
- защита щита собственных нужд;
- передача информации в АСУ ТП.

Комплекс обеспечивает мониторинг основных первичных электрических и технологических параметров компонентов системы оперативного постоянного тока, вычисления вторичных параметров, характеризующих состояние системы, а также заблаговременно информирует о предаварийных и

аварийных состояниях системы.

Сравнение СМОТ по характеристикам и контролируемым параметрам показано (табл. 6).

Исходя из данных (см. табл. 6) видим, что КМСОТ-М «Дубна» производителя ООО «Техноэнергокомплект» контролирует больше параметров и позволяет измерять сопротивление изоляции с большим диапазоном.

### Заключение

Сравнительный анализ отечественного оборудования уровня процесса цифровой тяговой подстанции позволяет дать рекомендации в целях унификации ЦТП по применению на тяговых подстанциях переменного тока с классами напряжения 220(110)/27,5/10 кВ оборудования, приведенного в (табл. 7).

**Таблица 6.** Характеристики и контролируемые параметры системы мониторинга и диагностики цепей оперативного тока

**Table 6.** Characteristics and controlled parameters of systems of monitoring and diagnostics of circuits of operating current

Показатель	Производитель	
	ООО «Техноэнергокомплект»	ОО ПК «Электроконцепт»
Интерфейс	МЭК 61850	RS485
Контроль изоляции сети	+	+
Контроль изоляции секций и присоединений	+	–
Контроль состояния и положения выключателей	+	–
Контроль постоянного тока и напряжения	+	+
Контроль пульсаций	+	–
Контроль асимметрий напряжений групп АБ	+	–
Контроль температуры АБ	+	–
Диапазон измерения напряжения, В	От 0 до 300	От 150 до 300
Количество контролируемых присоединений, шт.	82	1 024
Диапазон измерения сопротивления, кОм	От 0 до 10 000	От 0 до 999

**Таблица 7.** Выбранное оборудование уровня процесса

**Table 7.** Selected process level equipment

Номинальное напряжение установки, кВ	Система мониторинга и диагностики		
	Назначение	Наименование	Производитель
220	Автотрансформатор	TDM	ООО «Dimrus»
220	Линии электропередачи	DiLin	
220	Ограничитель перенапряжения нелинейный	ОПН-датчик	
220	Преобразователи сигналов	ПАС/ПДС	АО «УралЭлектроТяжМаш»
110	Силовой трансформатор	TDM	ООО «Dimrus»
110	Линии электропередачи	DiLin	
110	Ограничитель перенапряжения нелинейный	ОПН-датчик	
110	Преобразователи сигналов	ПАС/ПДС	
27,5	Трансформатор собственных нужд	TDM-35	ООО «Dimrus»
27,5	Ограничитель перенапряжения нелинейный	ОПН-датчик	
10	Трансформатор собственных нужд	TDM-35	
10	Ограничитель перенапряжения нелинейный	ОПН-датчик	
10	Комплексные распределительные устройства и кабельные линии	BDM	
0,22	Цепи оперативного тока	КМСОТ-«Дубна»	ООО «Техноэнергокомплект»

Использование приведенного в данной работе оптимального оборудования позволит начать организацию цифровизации тяговых подстанций, выполняя первый уровень ЦТП и создавая базу для внедрения второго и третьего уровней, а также поз-

волит повысить надежность и безопасность работы всех видов электрооборудования подстанции [25] и снизить эксплуатационные расходы по их обслуживанию.

### Список литературы

1. Cherepanov A., Kutsiy A. Modeling of tractive power supply systems for heavy-tonnage trains operation // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501734.
2. Туйгунова А.Г., Худоногов И.А. Применение систем мониторинга на силовых трансформаторах тяговых подстанций ВСЖД // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте : XXI Межвуз. науч.-практ. конф. Красноярск, 2017. С. 7–12.
3. Крюков А.В., Куцкий А.П., Черепанов А.В. Применение управляемых источников реактивной мощности в системах электроснабжения железных дорог // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. Иркутск, 2016. Т. 1. С. 588–593.
4. Казаков Д.О., Пузина Е.Ю. Технические решения по цифровизации тяговых подстанций // Молодая наука Сибири. 2021. № 1(11). С. 227–237.
5. СТО 56947007- 29.240.10.299-2020. Цифровая подстанция : метод. указания по проектированию ЦПС. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС».
6. Король Ю.Н. Концепция цифровой тяговой подстанции. М. : Трансэнерго, 2020. 28 с.
7. МЭК 61850 Цифровая подстанция / Электротехнический завод «ВЕКТОР». URL: [https://etv-vektor.ru/storage/document/file\\_46.pdf](https://etv-vektor.ru/storage/document/file_46.pdf) (дата обращения 17.06.2021).
8. Пузина Е.Ю., Туйгунова А.Г., Худоногов И.А. Системы мониторинга силовых трансформаторов тяговых подстанций. Иркутск, 2020. 184 с.
9. Пузина Е.Ю. Оценка остаточного ресурса тяговых трансформаторов Северного хода ВСЖД // Транспорт-2013 : тр. междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону : Изд-во РГУПС, 2013. С. 173–175.
10. Partial Discharges Pattern Recognition of Transformer Defect Model by LBP & HOG Features / Firuzi Keyvan, Vakilian Mehdi, B. Toan Phung et al. // Power Delivery IEEE Transactions on. 2019. Vol. 34. № 2. P. 542–550.
11. Dang Y., Chen W. Design of Oil-Immersed Apparatus Oil Velocity Measure System Based on the Ultrasonic Wave Doppler Effect // 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8493986.
12. Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer / X. Zhu, M. Chen, Sh. Xie et al. // 2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). Birmingham, 2016. P. 111–115. DOI: 10.1109/ICIRT.2016.7588719.
13. Kalathiripi H., Karmakar S. Fault analysis of oil-filled power transformers using spectroscopy techniques, 2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Manchester, 2017. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICDL.2017.8124633.
14. Система мониторинга состояния изоляции / Е.Ю. Дульский, П.Ю. Иванов, А.А. Хамнаева и др. // Железнодорожный транспорт. 2021. № 3. С. 50–52.
15. Определение остаточной несущей способности металлических конструкций контактной сети / В.П. Ступицкий, И.А. Худоногов, В.А. Тихомиров и др. // Известия Трансиба. 2019. № 3 (39). С. 88–99.
16. Тихомиров В.А. Повышение эффективности процесса сушки изоляции тяговых электрических машин подвижного состава : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2012.
17. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Evaluation of short circuit currents effects on power transformers' residual service life. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743069.
18. Применение распределенного мониторинга качества электрической энергии в MICROGRID / К.В. Суслов, Н.Н. Солонина, А.С. Смирнов и др. // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2014. № 6 (89). С. 185–189.
19. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized Diagnostic Parameter for Condition Assessment of Power Transformer Windings Insulation // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867610.
20. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Modeling turn insulation thermal aging process for traction substation transformer // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112021.
21. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. The use “Technical rigidity” indices to assess climatic factors effects on power transformers reliability // 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216258.
22. Системы мониторинга и диагностические приборы для контроля технического состояния высоковольтного оборудования / ООО «Dimrus». URL: <https://dimrus.ru/manuals/dimrus2019.pdf>. (дата обращения 21.05.2021).
23. Устройство мониторинга высоковольтного выключателя / ООО «АСУ-ВЭИ». Москва, 2020. 4 с.
24. Комплекс мониторинга систем оперативного тока серии КМСОТ-«Дубна» // Технокомплект : сайт. URL: <https://thc-samara.ru/product/sistema-operativnogo-postoyannogo-toka/sistemy-raspredeleeniya-postoyannogo-toka/kompleks-monitoringa-operativnogo-toka/kompleks-monitoringa-sistemy-operativnogo-toka-kmsot-m-dubna/> (дата обращения 21.05.2021).

25. Обеспечение безопасности сложных технических систем (технологические подходы) / С.В. Елисеев, В.Е. Гозбенко, Н.М. Быкова и др. Деп. ВИНТИ РАН 17.04.2008, № 328-В2008.

### References

1. Cherepanov A., Kutsiy A. Modeling of tractive power supply systems for heavy-tonnage trains operation. *International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018*. Pp. 8501734.
2. Tuigunova A.G., Khudonogov I.A. Primenenie sistem monitoringa na silovykh transformatorakh tyagovykh podstantsii VSZhD [Application of monitoring systems on power transformers of traction substations of VSZH D]. *Innovatsionnye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte XXI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii KrIZhT [Innovative technologies in railway transport of the XXI Interuniversity Scientific and Practical Conference of the KrIZhT]*. IrGUPS Publ., 2017. Pp. 7–12.
3. Kryukov A.V., Kutsiy A.P., Cherepanov A.V. Primenenie upravlyaemykh istochnikov reaktivnoi moshchnosti v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznynykh dorog [The use of controlled sources of reactive power in railroad power supply systems]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona [Transport infrastructure of the Siberian region]*, 2016. Vol. 1. Pp. 588–593.
4. Kazakov D.O., Puzina E.Yu. Tekhnicheskie resheniya po tsifrovizatsii tyagovykh podstantsii [Technical solutions for digitalization of traction substations]. *Molodaya nauka Sibiri [The young science of Siberia]*, 2021. No. 1(11). Pp. 227–237.
5. STO 56947007- 29.240.10.299-2020. Tsifrovaya podstantsiya. Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu TsPS. Standartorganizatsiia «FSK EES» [STO 56947007-29.240.10.299-2020. Digital substation. Methodological guide lines for the design of the CPS. The standard of the organization of “FGC UES” PAO].
6. Korol' Yu.N. Kontseptsiya tsifrovoi tyagovoi podstantsii [The concept of a digital traction substation]. Moscow: Transenergo Publ, 2020. 62 p.
7. Elektrotekhnicheskiy zavod «VEKTOR». MEK 61850 Tsifrovaya podstantsiya [Electrotechnical plant “VECTOR”. IEC 61850 Digital Substation], 2020. 22 p.
8. Puzina E.Yu., Tuigunova A.G., Khudonogov I.A. Sistemy monitoringa silovykh transformatorov tyagovykh podstantsii. [Monitoring systems of power transformers of traction substations]. Irkutsk, 2020. 184 p.
9. Puzina E. Yu. Otsenka ostatochnogo resursa tyagovykh transformatorov Severnogo khoda VSZhD [Evaluation of the residual service life of the Northern route traction transformers East Siberian Railroad]. *Transport-2013: trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Transport-2013: proceedings of the international scientific and practical conference]*. Rostov-on-don: RSUPS Publ., 2013, Pp. 176–178.
10. Firuzi K., Vakilian M., Toan Phung B., Blackburn T., Partial discharges pattern recognition of transformer defect model by LBP & HOG features. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019. Vol. 34. No. 2. Pp. 542–550.
11. Dang Y., Chen W. Design of oil-immersed apparatus oil velocity measure system based on the ultrasonic wave doppler effect. *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. Palermo, 2018. Pp. 1–4.
12. Zhu X., Chen M., Xie Sh., Luo J. Research on new traction power system using power flow controller and Vx connection transformer, *2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, Birmingham, 2016. Pp. 111–115.
13. Kalathiripi H., Karmakar S. Fault analysis of oil-filled power transformers using spectroscopy techniques. *2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*. Manchester, 2017. Pp. 1–5.
14. Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Khamnaeva A.A., Divinets M.A., Korsun A.A. Sistema monitoringa sostoyaniya izolyatsii [Insulation condition monitoring system]. *Zheleznodorozhnyi transport [Railway transport]*, 2021. No. 3. Pp. 50–52.
15. Stupitskii V.P., Khudonogov I.A., Tikhomirov V.A., Lobanov O.V. Opredelenie ostatochnoi nesushchei sposobnosti metallicheskiikh konstruksii kontaktnoi seti. [Determination of the residual bearing capacity of metal structures of the contact network]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2019. No. 3 (39). Pp. 88–99.
16. Tikhomirov V.A. Povyshenie effektivnosti protsessa sushki izolyatsii tyagovykh elektricheskikh mashin podvizhnogo sostava. Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Improving the efficiency of the insulation drying process of traction electric vehicles of rolling stock. Ph.D. (Engineering) diss.]. Omsk State University of Railway Transport Publ. Irkutsk, 2012.
17. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Evaluation of short circuit current effect on power transformers' residual service life. *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019*. Pp. 8743069.
18. Suslov K.V., Solonina N.N., Smirnov A.S., Solonina Z.V. Primenenie raspredelenno monitoringa kachestva elektricheskoi energii v MICROGRID [Application of distributed monitoring of the quality of electrical energy in MICROGRID]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2014. No. 6 (89). Pp. 185–189.
19. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized diagnostic parameter for condition assessment of power transformer windings insulation. *Proceedings – 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019*. 2019. Pp. 8867610.
20. Khudonogov I.A., Puzina E.Y., Tuigunova A.G. Modeling turn insulation thermal aging process for traction substation transformer (2020). *Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020*, p. 9112021.
21. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. The use of “technical rigidity” indice to assess climate factors effect on power transformers reliability. *Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020*. Pp. 136–141.

22. ООО «Dimrus». *Sistemy monitoringa i diagnosticheskie pribory dlya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaiya vysokovol'nogo oborudovaniya* [Dimrus ООО. Monitoring systems and diagnostic devices for monitoring the technical condition of high-voltage equipment]. Moscow, 2019. Pp. 2–82.

23. ООО «ASU-VEI». *Ustroistvo monitoringa vysokovol'nogo vyklyuchatelya* [ASU-VEI ООО. High voltage circuit breaker monitoring device]. Moscow, 2020. 4 p.

24. Сайт компании «Технокомплект». *Kompleks monitoringa sistem operativnogo tokoerii KMSOT-«Dubna»* [The website of the Technokomplekt company. The monitoring complex of operational current systems of the KMSOT series “Dubna”] [Electronic media]. URL: <https://thc-samara.ru/product/sistema-operativnogo-postoyannogo-toka/sistemy-raspredeleniya-postoyannogo-toka/kompleks-monitoringa-operativnogo-toka/kompleks-monitoringa-sistemy-operativnogo-toka-kmsot-m-dubna/>.

25. Eliseev S.V., Gozbenko V.E., Bykova N.M., Sobolev V.I., et al. *Obespechenie bezopasnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem (tekhnologicheskie podkhody)*. Deponirovannyy dokopis'. VINITI RAN № 328-V2008 17.04.2008. [Ensuring the safety of complex technical systems (a technological approach). The deposited manuscript. VINITI RAS. No. 328-B2008 April 17, 2008].

### Информация об авторах

**Пузина Елена Юрьевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: lena-rus05@mail.ru

### Information about the authors

**Elena Yu. Puzina** – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. at the Subdepartment of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; Assoc. Prof. at the Subdepartment of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: lena-rus05@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).104-112

УДК 629.4.051.2

## Адаптивная подсыпка песка на локомотиве

**С. П. Круглов**✉, **С. В. Ковыршин**, **П. Ю. Иванов**, **С. А. Исупов**

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

✉ [kruglov\\_s\\_p@mail.ru](mailto:kruglov_s_p@mail.ru)

### Резюме

В статье предложен путь совершенствования системы защиты от боксования и юза (на примере борьбы с боксованием) современного локомотива, который связан только с подсыпкой песка. Вместо широко используемого метода автоматического управления подсыпкой по релейному принципу, предлагается создать плавное регулирование этого процесса, построенное на адаптивном методе управления. Последний основывается на алгоритме текущей параметрической идентификации математической модели объекта управления с использованием неявной эталонной модели и «упрощенных» условий адаптируемости. Такое управление нацелено на ликвидацию боксования колесных пар локомотива в необходимых случаях с минимально возможным расходом песка, что повышает экономическую эффективность перевозок. Предполагается, что управление автоматически формируется и отрабатывается в условиях неопределенности текущих характеристик сцепления колеса с рельсом, некоторых параметров поезда, угла наклона пути и др. (или только приблизительной информации о них), что является типичной ситуацией на практике. Указанное управление было построено и исследовано на математической модели процесса боксования, сведенной к одной колесной паре локомотива, которая описана в первой части статьи. Это позволяет упростить рассмотрение сути предлагаемого метода без снижения общности выводов для более сложных постановок задач защиты от боксования. Приведены модельные примеры функционирования предлагаемого закона управления пескоподачей для типовых случаев появления боксования: на разгоне поезда при превышении тяги над силой сцепления и при подъеме поезда в гору с наездом на масляные пятна на рельсах. Полученные теоретические выводы и результаты модельных исследований показывают эффективность предложенного адаптивного метода управления пескоподачей и возможность построения несложной микропроцессорной системы управления пескоподачей, дополняющей штатную систему локомотива, направленную на устранение боксования.

### Ключевые слова

система защиты от боксования и юза, подсыпка песка, текущая неопределенность, адаптивная система управления, алгоритм идентификации

### Для цитирования

Круглов С.П. Адаптивная подсыпка песка на локомотиве / С. П. Круглов, С. В. Ковыршин, П. Ю. Иванов, С. А. Исупов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 104–112. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).104-112

### Информация о статье

поступила в редакцию: 02.03.2021, поступила после рецензирования: 07.03.2021, принята к публикации: 21.03.2021