

Расчет и конструирование Calculation and design

Научная статья
УДК 621.331.5
DOI: 10.14529/engin230401

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА АКТИВНОГО ПОЛУПРИЦЕПА

*Д.В. Дубовик*¹, dubovikdv@bmstu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2868-6501>

*Т.В. Голубчик*¹, golubchik@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6908-9427>

*А.С. Дьяков*¹, diakov57@list.ru

*Р.А. Закиров*², zakirovra@susu.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В статье проанализированы и описаны теоретические аспекты и проблемы, возникающие при расчете токов короткого замыкания системы электроснабжения тягового электропривода переменного тока (в составе энергосистемы имеются полупроводниковый выпрямитель и тяговый инвертор), размещенного на шасси полуприцепа (активного полуприцепа), входящего в состав «Арктического автопоезда». Обозначенные выше вопросы проработаны, но тем не менее выводы требуют уточнений посредством дополнительной экспериментальной проверки. Активный полуприцеп предназначен для транспортировки многофункционального модуля медицинского и хозяйственно-бытового назначения при температурах окружающего воздуха от минус 50 до плюс 40 °С по дорогам с твердым покрытием, по грунтовым дорогам различного состояния, по местности с грунтами со слабой несущей способностью и снежной целине. Тяговый электропривод в составе активного полуприцепа предназначен для создания дополнительных тяговых усилий при тяжелых условиях движения транспортного средства с целью преодоления препятствий, бездорожья и возвышенностей.

Данный полуприцеп создается в рамках проекта по разработке унифицированного семейства транспортных средств «Арктический автобус» и «Арктический автопоезд с транспортируемым функциональным модулем» для организации безопасной перевозки пассажиров и мобильных пунктов социальной сферы в районах Крайнего Севера в условиях низких температур (до минус 50 °С) и для обеспечения связанности территорий Арктической зоны Российской Федерации.

В связи с этим традиционные методы расчета токов короткого замыкания, а также типовые принципы выбора аппаратов защиты, проверки их уставок, уставок предохранителей, стойкости кабельных линий и шин к токам короткого замыкания не могут быть применены к системе электроснабжения тягового электропривода активного полуприцепа, что обуславливает актуальность и необходимость дальнейших исследований в этой области, поэтому в данной статье предлагаются расчеты, которые, на наш взгляд, могут быть использованы при разработке методики расчета токов короткого замыкания системы электроснабжения тягового электропривода с использованием обратимых и необратимых полупроводниковых преобразователей со звеном постоянного тока.

Ключевые слова: ток короткого замыкания, электропривод, дизель-генераторная установка, повышающий трансформатор, выпрямитель, тяговый инвертор, тяговый электродвигатель

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства «Создание высокотехнологичного производства унифицированного семейства транспортных средств «Арктический автобус» для организации безопасной перевозки пассажиров и мобильных пунктов социальной сферы в районах Крайнего Севера в условиях низких температур (до минус 50 °С) для обеспечения связанности территорий Арктической зоны Российской Федерации» с использованием мер государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и

организаций реального сектора экономики, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, предусмотренных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 по Соглашению № 075-11-2021-058 от 25.06.2021 г. (Идентификатор государственного контракта 000000S407521QLY0002) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и Акционерным обществом «Автомобильный завод «УРАЛ» в кооперации с Головным исполнителем НИОКТР – Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Для цитирования: Теоретические аспекты и проблемы расчета токов короткого замыкания системы электроснабжения тягового электропривода активного полуприцепа / Д.В. Дубовик, Т.В. Голубчик, А.С. Дьяков, Р.А. Закиров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2023. Т. 23, № 4. С. 5–20. DOI: 10.14529/engin230401

Original article
DOI: 10.14529/engin230401

THEORETICAL ASPECTS AND PROBLEMS OF CALCULATING SHORT-CIRCUIT CURRENTS POWER SUPPLY SYSTEMS OR THE TRACTION ELECTRIC DRIVE OF AN ACTIVE SEMI-TRAILER

D.V. Dubovik¹, dubovikdv@bmstu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2868-6501>
T.V. Golubchik¹, golubchik@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6908-9427>
A.S. Diakov¹, diakov57@list.ru
R.A. Zakirov², zakirovra@susu.ru

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article describes and analyzes theoretical aspects and problems arising from the calculation of short-circuit currents of the power supply system of the traction electric drive of alternating current. The power system includes a semiconductor rectifier and a traction inverter. The electric drive is located on the chassis of a semi-trailer, an active semi-trailer, which is part of the “Arctic road train”. The above issues have been worked out, but, nevertheless, the conclusions require clarification through additional experimental verification. The active semi-trailer is designed to transport a multifunctional module for medical and household purposes at ambient temperatures from minus 50 to plus 40 °C on paved roads, on dirt roads of various conditions, on terrain with soils with weak bearing capacity and virgin snow.

The traction electric drive as part of an active semi-trailer is designed to create additional traction forces in difficult vehicle driving conditions in order to overcome obstacles, off-road and hills.

This semi-trailer is being created as part of a project to develop a unified family of vehicles “Arctic Bus” and “Arctic Road Train with a Transportable Functional Module” to organize the safe transportation of passengers and mobile social points in the Far North at low temperatures (up to minus 50 °C) and to ensure the connectivity of the territories of the Arctic zone of the Russian Federation.

In this regard, traditional methods for calculating short-circuit currents, as well as typical principles for choosing protection devices, checking their settings, fuse settings, resistance of cable lines and buses to short-circuit currents cannot be applied to the power supply system of the traction electric drive of an active semi-trailer, which determines the relevance and necessity of further research in this area. This article proposes calculations which can be used in the development of a methodology for calculating short-circuit currents of the power supply system of a traction electric drive using reversible and irreversible semiconductor converters with a direct current link.

Keywords: short-circuit current, electric drive, diesel generator set, transformer, rectifier, traction inverter, traction motor

Acknowledgments. The work is financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of a comprehensive project to create high-tech production “Creation of high-tech production of an unified family of vehicles “Arctic Bus” to organize the safe transportation of passengers and mobile points of the social sphere in the regions of the Far North in conditions of low tem-

peratures (up to minus 50 °C) to ensure the connectivity of the territories of the Arctic zone of the Russian Federation” under the agreement No. 075-11-2021-058 dated 06/25/2021 (Government Contract ID 000000S407521QLY0002).

For citation: Dubovik D.V., Golubchik T.V., Diakov A.S., Zakirov R.A. Theoretical aspects and problems of calculating short-circuit currents power supply systems or the traction electric drive of an active semi-trailer. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2023;23(4):5–20. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin230401

Введение

Шасси активного полуприцепа состоит из рамы, колесных движителей, трансмиссии, подвески, редуктора, системы тягово-энергетического оборудования (СТЭО), располагаемого в технологическом отсеке, и тягового электродвигателя, который через механическую трансмиссию приводит во вращение движители полуприцепа.

Внешний вид транспортного средства «Арктический автопоезд с транспортируемым функциональным модулем» представлен на рис. 1.

СТЭО включает в себя дизель-генераторную установку (ДГУ), повышающий трансформатор (ПТ), трехфазный выпрямитель (В), тяговый инвертор (ТИ), тяговый электродвигатель (ТЭД), коммутационные аппараты и аппараты защиты, систему контроля и управления (СУ).

Дизель-генераторная установка является источником питания тягового электропривода активного полуприцепа, а также обеспечивает питанием вспомогательное электрооборудование.

Устройство, обеспечивающее преобразование электроэнергии для питания ТЭД, – тяговый инвертор (ТИ), который, в свою очередь, получает питание от ДГУ через повышающий трансформатор и выпрямитель.

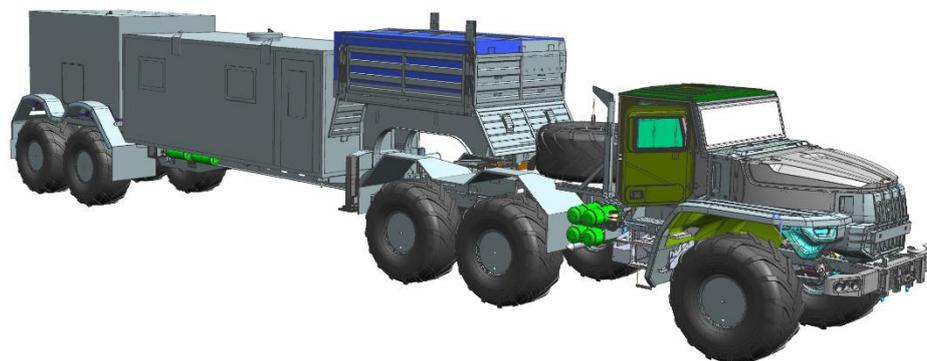


Рис. 1. Арктический автопоезд с транспортируемым функциональным модулем
Fig. 1. Arctic road train with transportable functional module

В данной системе электроснабжения электроэнергию вырабатывает трехфазный синхронный генератор, подключенный через повышающий трансформатор к полупроводниковому выпрямителю. Тяговый инвертор, получая питание от выпрямителя, преобразует постоянное напряжение в переменное с заданными системой управления характеристиками для питания тягового электродвигателя. Традиционные методы для расчета токов короткого замыкания в этом случае неприменимы. Поскольку синхронный генератор может работать с переменной частотой вращения, а тяговый электродвигатель может подпитываться током места возникновения короткого замыкания на шинах звена постоянного тока (ЗПТ) между выпрямителем и тяговым инвертором через обратные диоды тягового инвертора. При этом величина тока короткого замыкания от системы будет зависеть от индуктивных характеристик генератора и увеличивается при снижении частоты вращения синхронного генератора. Величина тока подпитки места возникновения короткого замыкания на шине постоянного тока от тягового электродвигателя коррелирует с частотой вращения, нагрузкой и температурными характеристиками ТЭД в различных режимах работы [1–5].

Как отмечают исследователи А.В. Григорьев, А.Ю. Васильев, Ю.А. Кулагин: «Момент возникновения аварийного режима КЗ может произойти при любой частоте вращения гребного вин-

та. Если на выходе вентильных генераторов напряжение имеет постоянное значение, то на выходе автономного инвертора напряжение, а, следовательно, и противоЭДС ГЭД могут отличаться от номинальной величины» [5–8]. ГЭД – гребной электродвигатель.

Интересующая нас система имеет сходство с описанной данными исследователями, поэтому при расчете токов КЗ в ней возникают аналогичные трудности. Также на ток короткого замыкания в ЗПТ влияет силовой конденсатор, установленный на входе питания тягового инвертора.

Описание выбранного электрооборудования СТЭО активного полуприцепа

Тяговый электродвигатель. В результате выполненного расчета на стадии эскизного проектирования определена мощность тягового электродвигателя, необходимая для преодоления указанных выше условий движения и выполнения требований технического задания (ТЗ). При выборе ТЭД сравнивались основные функциональные характеристики, параметры и показатели. С учётом всех описанных в эскизном проектировании задач был выбран ТЭД ДАТ-72 производства АО «Сарапульский электрогенераторный завод».

Дизель-генераторная установка. Мощность ДГУ должна превышать на 35–75 % суммарную мощность потребителей, которые будут подключены к ДГУ, с учетом потерь на преобразование электроэнергии. Общая нагрузка на ДГУ должна быть ориентировочно 50–70 % от максимальной мощности ДГУ, что соответствует оптимальному режиму работы. Для электроснабжения асинхронных электродвигателей (АД) следует учитывать кратковременный пусковой ток, который в 5–8 раз превышает номинальный при прямом пуске АД. Согласно ГОСТ Р 50783-95 [8–11] при мощности ДГУ до 100 кВт должен обеспечиваться прямой пуск АД мощностью 60 % от номинальной мощности ДГУ, при этом нагрузка на валу АД не должна превышать 30 % от номинального вращающего момента. С учетом ограничения по габаритным размерам была выбрана ДГУ ЭД100 производства ООО «ПИК«ЯрДизель».

Повышающий трансформатор. Поскольку трансформатор должен пропускать без перегрузки полную мощность генератора, трансформатор выбирается исходя из соотношения

$$S_{ТГ} \geq S_{НГ}, \quad (1)$$

где $S_{ТГ}$ – номинальная полная мощность повышающего трансформатора, кВА; $S_{НГ}$ – номинальная полная мощность генератора (альтернатора) дизель-генераторной установки, кВА.

Выбранный повышающий трансформатор отвечает заявленным параметрам:

$$S_{ТГ} = S_{НГ} = 125 \text{ кВА.}$$

Для повышения напряжения после ДГУ устанавливается повышающий трехфазный двухобмоточный трансформатор ТСЗ-125/0,7-ХЛ2 125кВА 400/530 В, Y/Y-0 Cu F IP55 производства ООО «ПЗСТ».

Трехфазный выпрямитель. В составе СТЭО применяется трехфазная мостовая схема (схема Ларионова), применяется без фильтра из-за высоких эксплуатационных и конструкционных характеристик [3]. Выбран трехфазный выпрямитель SEMIKRON SKD 160/16.

Тяговый преобразователь напряжения. Предназначен для преобразования после выпрямителя выпрямленного тока в переменный для питания и управления тяговым электродвигателем АПП. Выбран тяговый инвертор ТИ-160 производства ООО «ИРЗ ТЭК».

Основные технические характеристики выбранного оборудования СТЭО представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические параметры системы тягового электрооборудования активного полуприцепа
Main technical parameters of the traction electrical equipment system of an active semi-trailer

Table 1

Наименование компонента СТЭО	Основные технические характеристики компонента СТЭО по паспортным данным
Дизель-генераторная установка (ЭД100)	$U_H = 400 \text{ В};$ $f_H = 50 \text{ Гц};$ $I_H = 180 \text{ А};$ $P_H \text{ осн./рез.} = 100 / 110 \text{ кВт};$ $S_H \text{ осн./рез.} = 125 / 138 \text{ кВА};$ $\cos \phi_H = 0,8;$ $\eta = 95 \%$

Наименование компонента СТЭО	Основные технические характеристики компонента СТЭО по паспортным данным
Повышающий трансформатор (ТСЗ-125/0,7-ХЛ2 125кВА 400/530 В)	U_H обмотки ВН/НН = 400 / 530 В; $f_H = 50$ Гц; Соединение обмоток Y/Y-0; I_H обмотки ВН, 180,4 А; I_H обмотки НН, 136,2 А; $S_H = 125$ кВА; Напряжение короткого замыкания, 0,7 %; $\cos \phi_H = 0,98$; $\eta = 98$ %
Трехфазный выпрямитель (SEMİKRON SKD 160/16)	$V_{RMS} = 1600$ В – максимальное повторяющееся рабочее напряжение (предельное переменное амплитудное напряжение, подаваемое на мост); $V_{RRM}, V_{DRM} = 1600$ В – максимальное пиковое обратное напряжение; $I_D = 205$ А – средний прямой ток; $I_{FMS} = 1800$ А – ударный прямой ток при частоте 50 Гц; $\eta = 96$ %.
Тяговый инвертор (ТИ-160)	$V_{CC} = 600-800$ В, DC; $U_P = 350-850$ В; $f_P = 0-80$ Гц; $I_H = 300$ А; $P_H = 160$ кВт; $\eta = 97$ %
Тяговый электродвигатель (ДАТ-72)	$U_H = 500$ В; $f_H = 80$ Гц; $I_H = 130$ А; $P_H = 72$ кВт; $n_H = 2400$ об/мин; $M_H = 286$ Н·м; $M_{MAX} = 972$ Н·м; $M_{ПУСК} = 550$ Н·м; $\cos \phi_H = 0,7$; $\eta = 92$ %

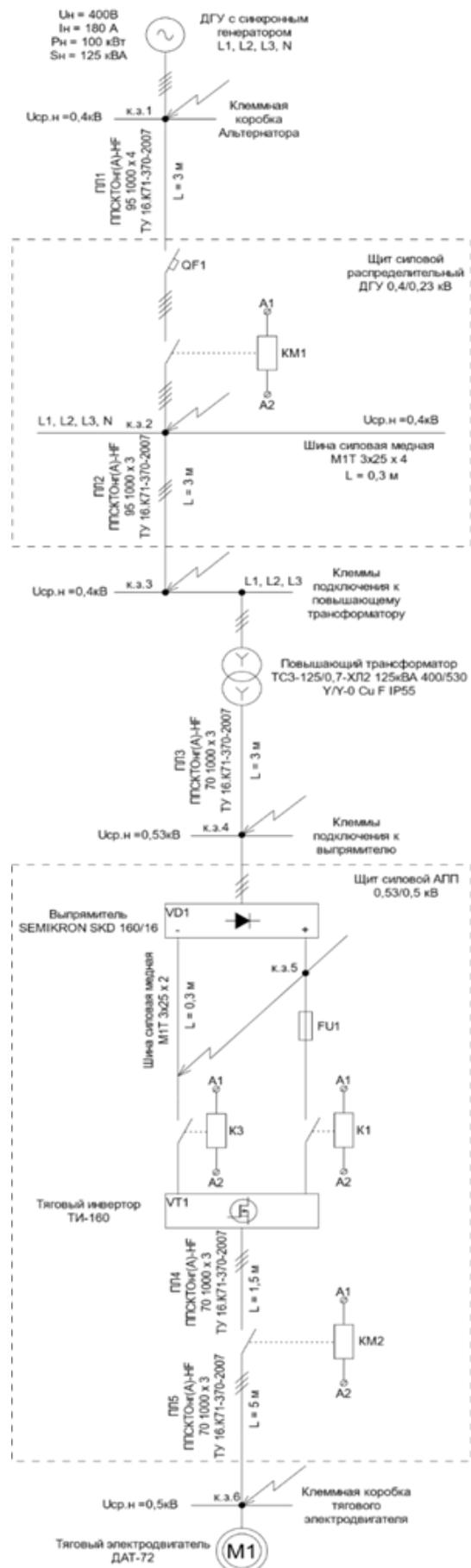
Расчет токов короткого замыкания представлен на примере системы переменного тока электропривода активного полуприцепа с ограниченной мощностью, напряжением до 1000 В.

Порядок расчета токов короткого замыкания

Составляется однолинейная расчетная схема [12–14]. На схеме указывают элементы электроустановки и их основные и номинальные параметры, которые участвуют в расчете. Определяют расчетные точки КЗ. Для каждой ступени расчета указывают среднее напряжение. Однолинейная схема электроснабжения тягового электропривода активного полуприцепа представлена на рис. 2.

После расчета сопротивлений элементов энергосистемы составляют эквивалентную электрическую схему замещения, где также указывают расчетные точки КЗ [12, 15, 16].

Определяя результирующее сопротивление от источника до каждой расчетной точки КЗ, по закону Ома рассчитываются токи КЗ. При необходимости определяется аperiodическая составляющая тока КЗ, ударный ток, периодическая составляющая в отдельных ветвях схемы [17].



Завершающим этапом расчета токов короткого замыкания является проверка выбранных аппаратов защиты на их уставку, уставку предохранителей, стойкости кабельных линий и шин к токам короткого замыкания.

Расчетная однолинейная схема электроснабжения тягового электропривода активного полуприцепа содержит преобразовательный контур постоянного тока, поэтому в схеме замещения в цепи постоянного тока учитывается только активное сопротивление проводников (полные сопротивления проводов и кабелей в зависимости от их длины и сечения), переходное сопротивление контактов коммутационных аппаратов.

Расчет параметров схемы замещения

Определение сопротивлений энергосистемы для схемы замещения начинается с выбора базисных величин [18–20]. Рассчитаем базисную мощность $S_б$, базисное напряжение $U_б$ и базисное сопротивление системы $Z_с$. За базисную мощность в нашем случае примем номинальную полную мощность генератора. Для основной ступени, для которой производится расчёт токов короткого замыкания, принимается $U_б = U_{ср}$. Среднее значение напряжения первой ступени электрической цепи $U_{ср}$ берётся на 5 % выше номинального напряжения сети:

$$U_{ср} = 1,05 * U_{нг} = 1,05 * 400 = 420 \text{ В.} \quad (2)$$

Рассчитываем базисный ток и сопротивление системы, исходя из принятых базисной мощности и напряжения:

$$I_б = \frac{S_б}{\sqrt{3} * U_б} = \frac{125\,000}{1,73 * 420} = 172 \text{ А,} \quad (3)$$

$$Z_с = \frac{U_б^2}{S_б} = \frac{420^2}{125\,000} = 1,411 \text{ Ом.} \quad (4)$$

Расчет сопротивления генератора ДГУ

По ГОСТ 28249-93 [7, 21] при расчете начального значения периодической составляющей тока КЗ автономных источников, а также синхронных электрических машин следует учитывать сверхпереходное сопротивление по продольной оси ротора x_d'' , а при определении постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ – индуктивное сопротивление для токов обратной последовательности x_2 и активное сопротивление обмотки статора r . При приближенных расчетах принимают:

Рис. 2. Расчетная однолинейная схема электроснабжения тягового электропривода активного полуприцепа
Fig. 2. Calculated single-line diagram of the power supply of the traction electric drive of an active semi-trailer

$$x_{d(\text{ном})}'' = 0,15; x_2 = x_d''; r = 0,15 * x_d'' \quad (5)$$

Индуктивное сопротивление генератора (в Ом) для момента времени $t = 0$ определяется по выражению [1; 2]:

$$x_{\text{сг}} = x_d'' * \frac{U_{\text{нг}}^2}{S_{\text{нг}}} = 0,15 * \frac{400^2}{125000} = 0,192 \text{ Ом}, \quad (6)$$

$$r_{\text{сг}} = 0,15 * x_{\text{сг}} = 0,15 * 0,192 = 0,0288 \text{ Ом}, \quad (7)$$

где $r_{\text{сг}}$ – активное сопротивление синхронного генератора; $x_{\text{сг}}$ – индуктивное сопротивление синхронного генератора.

Найдем полное сопротивление синхронного генератора $Z_{\text{сг}}$:

$$Z_{\text{сг}} = \sqrt{r_{\text{сг}}^2 + x_{\text{сг}}^2} = \sqrt{0,0288^2 + 0,192^2} = 0,194 \text{ Ом}. \quad (8)$$

Расчет сопротивления повышающего трансформатора

Находим индуктивное сопротивление повышающего трансформатора $x_{\text{т}}$:

$$x_{\text{т}} = \frac{U_{\text{кз}}}{100} * \frac{U_{\text{н.трНН}}^2}{S_{\text{н.тр}}} = \frac{0,7}{100} * \frac{530^2}{125000} = 0,0157 \text{ Ом}, \quad (9)$$

где $U_{\text{кз}}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора, %; $S_{\text{н.тр}}$ – номинальная мощность трансформатора, ВА, $U_{\text{н.трНН}}$ – номинальное напряжение повышающего трансформатора, приведенное к низкой стороне.

Находим активное сопротивление повышающего трансформатора $r_{\text{т}}$:

$$r_{\text{т}} = \frac{P_{\text{к}} * U_{\text{н.трНН}}^2}{S_{\text{н.тр}}^2} = \frac{700 * 530^2}{125000^2} = 0,0127 \text{ Ом}, \quad (10)$$

где $P_{\text{к}}$ – потери короткого замыкания, Вт.

Все значения приведены в паспортных данных к трансформатору.

Найдем полное сопротивление трансформатора $Z_{\text{т}}$:

$$Z_{\text{т}} = \sqrt{r_{\text{т}}^2 + x_{\text{т}}^2} = \sqrt{0,0127^2 + 0,0157^2} = 0,0202 \text{ Ом}. \quad (11)$$

Расчет сопротивления проводов

В табл. 2 представлены марка, сечение, количество и длина проводных линий (ПЛ), используемых в системе электроснабжения от источника (генератора ДГУ) до тягового асинхронного электродвигателя.

В соответствии с условиями эксплуатации выбран провод силовой с кремнийорганической изоляцией и оболочкой повышенной пожаробезопасности марки ППСКТОнг(А)-НФ, ТУ 16.К71-370-2007. Вид климатического исполнения – по ГОСТ 15150-69 [8, 22]. Значение климатических факторов – по ГОСТ 15543.1-89 [9, 22], диапазон температуры окружающей среды от –60 до 130 °С.

Активное и индуктивное сопротивление проводов и кабелей рассчитаем по следующим формулам:

$$r_{\text{пл1}} = r_{\text{уд.}} * l * k_{\text{п}} = 0,000191 * 3 * 4 = 0,0023 \text{ Ом}, \quad (12)$$

$$x_{\text{пл1}} = x_{\text{уд.}} * l * k_{\text{п}} = 0,0003 * 3 * 4 = 0,004 \text{ Ом}, \quad (13)$$

где $r_{\text{уд.}}$ – удельное активное сопротивление медного проводника и $x_{\text{уд.}}$ – удельное индуктивное сопротивление медного проводника (табл. 3); l – длина проводной линии, м, $k_{\text{п}}$ – количество проводников, параллельно проложенных в линии участка.

Для линий с проводами из цветных металлов значение удельного индуктивного сопротивления приближенно принимается равным 0,0003 Ом/м, значение активного сопротивления – по табл. 3 [1, 23].

Результирующее сопротивление проводных линий рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{пл1}} = \sqrt{r_{\text{пл1}}^2 + x_{\text{пл1}}^2} = \sqrt{0,0023^2 + 0,004^2} = 0,0043 \text{ Ом}. \quad (14)$$

Таблица 2
Параметры проводных линий электроснабжения энергосистемы системы тягового электрооборудования
активного полуприцепа

Table 2
Parameters of wired power supply lines of the power system of the traction electrical equipment system
of an active semi-trailer

№ участка на схеме замещения	Расположение ПЛ	Марка ПЛ	Сечение ПЛ, мм ²	Длина ПЛ, м
ПЛ 1	Проводная линия от контактной группы клемм генератора ДГУ до контактной группы клемм вводного автоматического выключателя QF1	ППСКТОнг(А)-HF	4 × 95	3
ПЛ 2	Проводная линия между контактным присоединением к шинопроводу щита распределительного ДГУ 0,4/0,23 кВ и контактной группой клемм подключения к первичной обмотке повышающего трансформатора		3 × 95	3
ПЛ 3	Проводная линия от контактной группы клемм вторичной обмотки повышающего трансформатора до контактной группы клемм присоединения к выпрямителю щита силового АПП 0,53/0,5 кВ	ППСКТОнг(А)-HF	3 × 70	3
ПЛ 4	Проводная линия от контактной группы клемм тягового инвертора до контактной группы клемм контактора КМ2 в щите силовом АПП 0,53/0,5 кВ			1,5
ПЛ 5	Проводная линия от контактной группы клемм контактора КМ2 до контактной группы клемм тягового электродвигателя			5

Таблица 3
Удельное активное и индуктивное сопротивление проводов и кабелей по справочным данным ГОСТ 28249-93
Table 3
Specific active and inductive resistance of wires and cables according to reference data GOST 28249-93

№ участка на схеме замещения	Сечение жил, мм ² фазных	Активное сопротивление $r_{уд.}$, Ом/м	Индуктивное сопротивление $x_{уд.}$, Ом/м
ПЛ 1	4 × 95	0,000191	0,0003
ПЛ 2	3 × 95	0,000191	0,0003
ПЛ 3, ПЛ 4, ПЛ 5	3 × 70	0,000265	0,0003

При этом необходимо учитывать, что напряжение системы на участках увеличивается после повышающего трансформатора до 0,53 кВ, а после инвертора становится регулируемым до 0,5 кВ.

Аналогично рассчитаем остальные проводные линии энергосистемы. Расчеты представлены в табл. 4.

Таблица 4
Расчеты сопротивления проводных линий электроснабжения энергосистемы системы тягового электрооборудования активного полуприцепа

Table 4
Calculations of resistance of wire power supply lines of the power system of the traction electrical equipment system of an active semi-trailer

№ участка на схеме замещения	Активное сопротивление $r_{пл.}$, Ом	Индуктивное сопротивление $x_{пл.}$, Ом	Полное сопротивление проводной линии $Z_{пл.}$, Ом
ПЛ 1	0,0023	0,004	0,0043
ПЛ 2	0,0017	0,003	0,0032
ПЛ 3	0,0024	0,003	0,0036
ПЛ 4	0,0012	0,001	0,0018
ПЛ 5	0,0040	0,005	0,0060

Сопротивления переходных контактов автоматических выключателей, контакторов, контактных соединений проводов, шинпроводов

Значения сопротивлений разъемных контактов коммутационных аппаратов напряжением до 1 кВ определяются по ГОСТ 28249-93 [7, 24] (приложение 4, табл. 19). При приближенном учете сопротивление контактов принимают: 0,1 мОм – для контактных соединений кабелей; 0,01 мОм – для шинпроводов; 1,0 мОм – для коммутационных аппаратов. Занесем в табл. 5 приближенные значения сопротивления разъемных контактов выбранных коммутационных аппаратов напряжением до 1 кВ.

Таблица 5
Table 5

Приближенные значения сопротивлений разъемных контактов коммутационных аппаратов напряжением до 1кВ

Approximate resistance values of detachable contacts of switching devices with voltages up to 1 kV

№ участка на схеме замещения	Номинальный ток аппарата, А	Активное сопротивление, Ом, разъемных соединений	
		Автоматический выключатель, $Z_{AB(QF)}$	Контактор, $Z_{конт(КМ)}$
АВ (QF1)	250	0,0006	–
Контактор (К1)	500	–	0,0002
Контактор (К2)	500	–	0,0002
Контактор (КМ1)	250	–	0,0004
Контактор (КМ2)	300	–	0,0003

Для упрощения расчетов сопротивлениями в местах болтовых контактных соединений проводов, кабелей и шинпроводов можно пренебречь. Длина шин и шинпроводов в энергосистеме суммарно не превышает пяти метров, в связи с этим их сопротивление можно не учитывать, так как их влияние на ток КЗ невелико [1].

Расчет сопротивления асинхронного тягового электродвигателя

Полное сопротивление асинхронного электродвигателя рассчитывается по формуле

$$Z_{АД} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{пуск} \cdot I_{ном}} = \frac{500}{1,73 \cdot 5 \cdot 130} = 0,445 \text{ Ом.} \quad (15)$$

На рис. 3 приведена схема замещения с электрическими параметрами в именованных единицах. Расчет токов короткого замыкания в энергосистеме СТЭО АПП будем производить в действующем установившемся и квазиустановившемся (постоянном) режиме энергосистемы. В данном расчете подпитку места КЗ в точках (к.з. 1, к.з. 2, к.з. 3, к.з. 4, к.з. 5) от тягового электродвигателя не учитываем, учитываем только в точке к.з. 6. В расчетах токов к. з., приведенных ниже, приняты следующие допущения: не учитываются токи нагрузки; не учитываются емкости, а следовательно, и емкостные токи проводной сети; трехфазная сеть принимается симметричной, сопротивления фаз – точно равными друг другу; отсутствует насыщение стали электрических машин (генераторов, электродвигателей, трансформаторов); не учитываются токи намагничивания трансформаторов [2].

Расчет токов короткого замыкания в энергосистеме СТЭО АПП произведем по принципу суперпозиции

Исключаются все источники электрической цепи, кроме одного, определяется ток от действия этого источника. Исключают следующие источники, рассчитывают следующее состояние тока и так далее.

Рассчитаем начальное значение периодической слагающей тока трехфазного короткого замыкания от генератора до точки к.з.1 по формуле [1, 2, 4, 6]:

$$I_{кз1сист.}^{(3)} = \frac{U_{ср.н}}{\sqrt{3} \cdot Z_{рез.к.з.1}} = \frac{420}{1,73 \cdot 0,194} = 1250 \text{ А,} \quad (16)$$

где $U_{ср.н}$ – напряжение на контактной группе клемм генератора ДГУ, $Z_{рез.к.з.1} = Z_{сг}$ – результирующее сопротивление цепи КЗ, суммарное сопротивление от источника питания до точки КЗ. До точки к.з. 1 принимается равным сопротивлению генератора ДГУ.

Сопrotивления энергосистемы в именованных единицах:

- 1 - Сопrotивление генератора ДГУ;
- 2 - Сопrotивление проводной линии от генератора ДГУ до вводного автоматического выключателя QF1;
- 3 - Сопrotивление переходных контактов автоматического выключателя QF1;
- 4 - Сопrotивление переходных контактов контактора KM1;
- 5 - Сопrotивление проводной линии между контактным присоединением к шинпроводу щита распределительного ДГУ 0,4/0,23кВ и контактной группой клемм подключения к первичной обмотке повышающего трансформатора;
- 6 - Сопrotивление повышающего трансформатора;
- 7 - Сопrotивление проводной линии между контактной группой клемм вторичной обмотки повышающего трансформатора и контактной группой клемм присоединения к выпрямителю;
- 8, 9 - Сопrotивление переходных контактов контакторов K1, K2;
- 10 - Сопrotивление проводной линии между контактной группой клемм тягового инвертора и контактной группой клемм присоединения к контактору KM2;
- 11 - Сопrotивление переходных контактов контактора KM2;
- 12 - Сопrotивление проводной линии между контактной группой клемм присоединения к контактору KM2 и контактной группой клемм присоединения к тяговому электродвигателю;
- 13 - Сопrotивление асинхронного тягового электродвигателя.

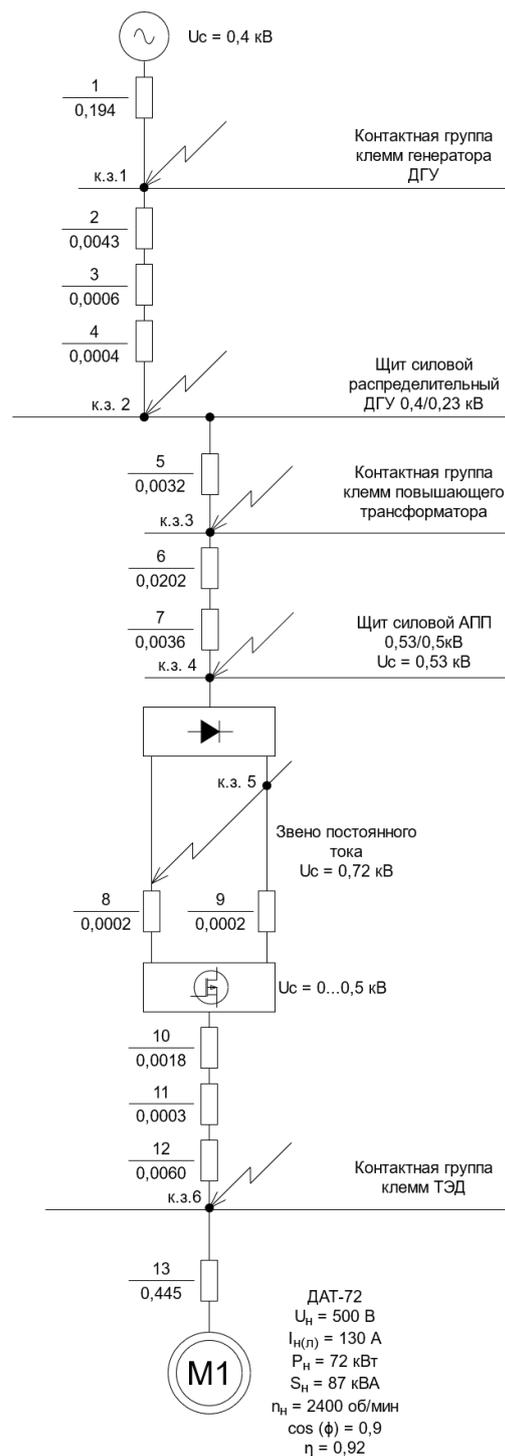


Рис. 3. Схема замещения системы тягового электрооборудования активного полуприцепа
Fig. 3. Replacement diagram for the traction electrical equipment system of an active semi-trailer

Рассчитаем результирующее сопротивление от системы до точки к.з. 2 по схеме замещения:

$$Z_{рез.к.з.2} = Z_{сг} + Z_{пл1} + Z_{ав(QF1)} + Z_{конт(кМ1)} = 0,1993 \text{ Ом.} \quad (17)$$

Находим значение тока КЗ в точке к.з. 2 от генератора:

$$I_{\text{кз2сист.}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.н}}}{\sqrt{3} * Z_{\text{рез.к.з.2}}} = \frac{420}{1,73 * 0,1993} = 1218 \text{ А.} \quad (18)$$

Рассчитаем результирующее сопротивление от системы до точки к.з. 3 по схеме замещения:

$$Z_{\text{рез.к.з.3}} = Z_{\text{сг}} + Z_{\text{пл1}} + Z_{\text{AB(QF1)}} + Z_{\text{КОНТ(КМ1)}} + Z_{\text{пл2}} = 0,2025 \text{ Ом.} \quad (19)$$

Находим значение тока КЗ в точке к.з. 3 от генератора:

$$I_{\text{кз3сист.}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.н}}}{\sqrt{3} * Z_{\text{рез.к.з.3}}} = \frac{420}{1,73 * 0,2025} = 1198,8 \text{ А.} \quad (20)$$

Рассчитаем результирующее сопротивление от системы до точки к.з. 4 по схеме замещения:

$$Z_{\text{рез.к.з.4}} = Z_{\text{сг}} + Z_{\text{пл1}} + Z_{\text{AB(QF1)}} + Z_{\text{КОНТ(КМ1)}} + Z_{\text{пл2}} + Z_{\text{T}} + Z_{\text{пл3}} = 0,2263 \text{ Ом.} \quad (21)$$

Находим значение тока КЗ в точке к.з. 4 от генератора. Учитываем, что точка к.з. 4 находится со стороны вторичной обмотки повышающего трансформатора, где $U_{\text{ср.н}} = 530 \text{ В}$.

$$I_{\text{кз4сист.}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ср.н}}}{\sqrt{3} * Z_{\text{рез.к.з.3}}} = \frac{530}{1,73 * 0,2263} = 1353,8 \text{ А.} \quad (22)$$

Для того чтобы определить ток короткого замыкания в точке к.з. 5, необходимо рассчитать действующее значение фазной ЭДС трехфазной системы переменного тока. Расчет тока короткого замыкания в звене постоянного тока осуществляем по ГОСТ 29176-91 [10]:

$$E = \frac{U_{\text{ном2}}}{\sqrt{3}} = \frac{530}{1,73} = 306,4 \text{ В.} \quad (23)$$

ЭДС холостого хода при выполнении преобразователей по трехфазной мостовой схеме следует вычислять по формулам:

$$E_{d0} = 2,34 * E = 2,34 * 306,4 = 717 \text{ В.} \quad (24)$$

При отсутствии катодных реакторов в выпрямительных агрегатах ток КЗ при замыкании полюсных проводов $I_{\text{кз5 ЗПТ}}$ в амперах следует определять по формуле

$$I_{\text{кз5 ЗПТ}} = \frac{E_{d0} - \Delta U_d}{R_{dk} + R_{\Sigma n} + R_{\Sigma 0} + (2 * r_{kc} * l_k)} = \frac{717}{0,392 + 0,0002 + 0,0002} = 1827,2 \text{ А,} \quad (25)$$

где ΔU_d – падение напряжения на электрической дуге, В; R_{dk} – сопротивление КЗ выпрямительной установки, Ом; $R_{\Sigma n}$ – суммарное активное сопротивление питающей линии (+), Ом; $R_{\Sigma 0}$ – суммарное активное сопротивление минусовой линии (-), Ом; l_k – удаленность КЗ (длина проводов, линии), км; r_{kc} – удельное активное сопротивление проводов линии сети, Ом/км.

Примечания: При определении максимального тока КЗ допустимо не учитывать предварительную нагрузку энергосистемы и падения напряжения в дуге и на вентилях, а также принимать $(2 * r_{kc} * l_k) = 0$.

Сопротивление КЗ выпрямительной установки R_{dk} в Омах следует определять по формуле

$$R_{dk} = \frac{E_{d0}}{m_a * I_{da}} = \frac{717}{1 * 1829,1} = 0,392 \text{ Ом,} \quad (26)$$

где m_a – число параллельно работающих выпрямительных агрегатов; I_{da} – ток КЗ на шинах выпрямительной подстанции от одного агрегата, А.

При этом следует принимать $I_{da} = I_{dy}$ и определять этот ток в зависимости от схемы, по которой выполнен преобразователь.

Среднее значение выпрямленного тока в месте повреждения при установившемся режиме КЗ и при выполнении преобразователей по трехфазной мостовой схеме следует определять по формулам:

$$I_{dy} = \left(\frac{3}{\pi}\right) * I_m = \left(\frac{3}{3,14}\right) * 1914,5 = 1829,1 \text{ A}, \quad (27)$$

где I_m – амплитуда периодической составляющей фазного тока вторичной (вентильной) обмотки преобразовательного трансформатора в амперах, которую определяют по выражению:

$$I_m = \frac{\sqrt{2} * E}{Z_{рез}} = \frac{1,414 * 306,4}{0,2263} = 1914,5 \text{ A}, \quad (28)$$

где $Z_{рез}$ – результирующее активное сопротивление от генератора до выпрямителя, Ом.

Рассчитаем результирующее сопротивление от системы до точки к.з. 6 по схеме замещения:

$$Z_{рез.к.з.6} = Z_{сг} + Z_{пл1} + Z_{AB(QF1)} + Z_{конт(кМ1)} + Z_{пл2} + Z_T + Z_{пл3} + Z_{\Sigma n} + Z_{\Sigma 0} + Z_{пл4} + Z_{конт(кМ2)} + Z_{пл5} = 0,2348 \text{ Ом}, \quad (29)$$

где $Z_{\Sigma n} = R_{\Sigma n}$, $Z_{\Sigma 0} = R_{\Sigma 0}$.

Находим значение тока КЗ в точке к.з. 6 от генератора. Учитываем, что точка к.з. 6 находится со стороны управляемого тягового инвертора, где $U_{ср.н} = 500 \text{ В}$:

$$I_{кз6сист.}^{(3)} = \frac{U_{ср.н}}{\sqrt{3} * Z_{рез.к.з.6}} = \frac{500}{1,73 * 0,2348} = 1231,5 \text{ A}. \quad (30)$$

Также учитываем ток подпитки в точку к.з. 6 от тягового асинхронного двигателя:

$$I_{кз6подпитки.}^{(3)} = \frac{U_{ср.н}}{Z_{АД}} = \frac{500}{0,454} = 1123,6 \text{ A}. \quad (31)$$

Суммарный ток КЗ в точке к.з. 6 с учетом подпитки от тягового асинхронного двигателя:

$$I_{кз6}^{(3)} = I_{кз6сист.}^{(3)} + I_{кз6подпитки.}^{(3)} = 1231,5 + 1123,6 = 2355,1 \text{ A}. \quad (32)$$

Заключение

Подводя итоги, можно отметить, что высказанное вначале мнение о том, что традиционные методы расчета токов короткого замыкания, а также типовые принципы выбора аппаратов защиты, проверки их уставок, уставок предохранителей, стойкости кабельных линий и шин к токам короткого замыкания не могут быть применены к системе электроснабжения тягового электропривода активного полуприцепа, получило подтверждение. Это обуславливается тем, что при проектировании энергосистемы СТЭО АПП применяются выпрямительное и инвертирующее устройства со звеном постоянного тока между ними. В связи с этим ток подпитки КЗ от тягового электродвигателя к точкам к.з. 1 – к.з. 4 в энергосистеме СТЭО АПП не протекает.

Следует отметить, что в методиках расчета токов КЗ принимается номинальный режим работы ДГУ. Снижение частоты вращения генератора, которая влияет на индуктивные характеристики, а следовательно, и на ток КЗ, не учитывается. Специфика работы автоматики ДГУ ЭД100 позволяет пользоваться данным допущением, так как при существенном отклонении частоты вращения приводного дизельного двигателя и ожидаемого падения напряжения на синхронном генераторе ДГУ автоматически завершает работу и отключается размыкателем от сети энергосистемы. В связи с этим при расчёте токов КЗ принимается данное допущение. Сопротивление полупроводников также не учитывается в силу малого влияния на ток КЗ. Полупроводники выпрямителя и инвертора должны быть рассчитаны на режимы, стойкие к КЗ, заводом изготовителем.

От звена постоянного тока получает питание автономный тяговый инвертор, проводящий электрический ток в обоих направлениях, оказывая существенное влияние на величину тока КЗ на шинах звена постоянного тока.

В связи с этим к токам КЗ, протекающим от генератора, добавляется периодическая составляющая не учитываемого, но упоминаемого в данном расчёте тока КЗ подпитки, протекающего от тягового электродвигателя через инвертор в точку к.з. 5.

На ток короткого замыкания в ЗПТ точка к.з. 5 также влияет силовой конденсатор, который установлен на входе питания тягового инвертора.

Частота вращения, нагрузка на вал, а также температурные характеристики тягового электродвигателя существенно влияют на токи короткого замыкания в подпитке в момент возникновения аварийного режима КЗ.

Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод, что шины в звене постоянного тока энергосистемы не могут быть проверены на термическую и электродинамическую стойкость к токам КЗ, так как не учитывается ток подпитки от тягового электродвигателя, следовательно, необходима разработка иной методики расчёта токов короткого замыкания для системы электроснабжения тягового электропривода с использованием обратимых и необратимых полупроводниковых преобразователей со звеном постоянного тока.

Достоинством предложенной методики являются расчеты, которые могут быть использованы при расчете токов короткого замыкания в подобных системах. Представляется важным отметить, что предлагаемые нами расчёты являются результатом теоретического моделирования, поэтому при экспериментальной проверке полученные результаты могут быть уточнены и скорректированы.

Актуальность дальнейших исследований в этой области не вызывает сомнений. Ближайшей задачей является экспериментальная проверка, в дальнейшем возможна адаптация данной методики расчёта токов КЗ к системам электроснабжения силового тягового оборудования передвижных тяговых подстанций, которым также для расчета токов КЗ не подходят традиционные методы и которые приближены к рассматриваемой энергосистеме СТЭО по техническим и конструктивным характеристикам.

Список литературы

1. Беляев А.В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сети 0,4 кВ. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. 176 с.
2. Беляева Е.Н. Как рассчитать ток короткого замыкания. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.
3. Борисов П.А., Томасов В.С. Расчет и моделирование выпрямителей: учебное пособие по курсу «Элементы систем автоматики». СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2009. Ч. I. 169 с.
4. Герасимов А.И., Кузьмин С.В. Электроснабжение предприятий: учеб. пособие. Красноярск, ГУЦМиЗ, 2005, 150 с.
5. Григорьев А.В., Васильев А.Ю., Кулагин Ю.А. Теоретические вопросы расчета токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9, № 5. С. 1095–1103.
6. Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю.Г. Барыбина и др. М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.
7. ГОСТ 28249-93 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. М.: Стандартинформ, 2006. 45 с.
8. ГОСТ 15150-69 Машины, приборы и другие технические изделия исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. М.: Стандартинформ, 2010. 8 с.
9. ГОСТ 15543.1-89 Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к климатическим внешним воздействующим факторам. М.: ИПК Изд-во стандартов. 2004. 7 с.
10. ГОСТ 29176-91 Короткие замыкания в электроустановках. Методика расчета в электроустановках постоянного тока. М.: ИПК Изд-во стандартов. 2004. 36 с.
11. ГОСТ Р 50783-95 Электроагрегаты и передвижные электростанции с двигателями внутреннего сгорания. М.: ИПК Изд-во стандартов. 1995. 25 с.
12. ТУ 16.К71-370-2007 Провода с кремнийорганической изоляцией и оболочкой повышенной пожаробезопасности для подвижного состава рельсового транспорта.

13. Pellegrino G., Armando E., Guglielmi P. Direct Flux Field-Oriented Control of IPM Drives With Variable DC Link in the Field-Weakening Region // *IEEE Trans. Ind.* 2009. Vol. 45, no. 5. P. 1619–1627.
14. Kwak S., Moon U.C., Park J.C. Predictive-Control-Based Direct Power Control With an Adaptive Parameter Identification Technique for Improved AFE Performance // *IEEE Transactions on Power Electronics.* 2014. Vol. 29, no. 11. P. 6178–6187.
15. Dannehl J., Wessels C. and Fuchs F.W. Limitations of Voltage-Oriented PI Current Control of Grid-Connected PWM Rectifiers With LCL Filters // *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 2009. Vol. 56, no. 2. P. 380–388.
16. Malinowski M., Jasinski M., Kazmierkowski M.P. Simple direct power control of three-phase PWM rectifier using space-vector modulation (DPC-SVM) // *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 2004. Vol. 51, no. 2. P. 447–454.
17. Predictive Duty Cycle Control of Three-Phase Active-Front-End Rectifiers / Z. Song, Y. Tian, W. Chen et al. // *IEEE Transactions on Power Electronics.* 2016. Vol. 31, no. 1. P. 698–710.
18. Rodriguez J. Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter // *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 2007. Vol. 54, no. 1. P. 495–503.
19. Model-Based Predictive Direct Control Strategies for Electrical Drives: An Experimental Evaluation of PTC and PCC Methods / F. Wang, S. Li, X. Mei et al. // *IEEE Transactions on Industrial Informatics.* 2015. Vol. 11, no. 3. P. 671–681.
20. Stando D., Kaźmierkowski M.P., Chudzik P. Sensorless predictive torque control of induction motor drive operating in wide speed range – Simulation study // *6th Int. Power Electronics and Motion Control Conf. and Exposition.* 2014. P. 521–526.
21. Advanced Control Methods of DC/AC and AC/DC Power Converters – Look-Up Table and Predictive Algorithms / A. Godlewska, R. Grodzki, P. Falkowski et al. // *Advanced Control of Electrical Drives and Power Electronic Converters.* 2017. P. 221–302. DOI: 10.1007/978-3-319-45735-2_10
22. Scoltock J., Geyer T., Madawala U. Model Predictive Direct Current Control for a grid-connected converter: LCL-filter versus L-filter // *IEEE Int. Conf. on Industrial Technology (ICIT).* 2013. P. 576–581.
23. Krein P.T., Balog R.S., Mirjafari M. Minimum energy and capacitance requirements for single-phase inverters and rectifiers using a ripple port // *IEEE Trans. Power Electron.* 2012. Vol. 27. P. 4690–4698.
24. Wang H., Chung H.S.H., Liu W. Use of a series voltage compensator for reduction of the dc-link capacitance in a capacitor-supported system // *IEEE Trans. Power Electron.* 2014. Vol. 29, no. 3. P. 1163–1175.

References

1. Belyaev A.V. *Vybor apparatury, zashchit i kabeley v seti 0,4 kV* [Selection of equipment, protection and cables in a 0.4 kV network]. Leningrad, 1988. 176 p.
2. Belyaeva E.N. *Kak rasschitat' tok korotkogo замыкания* [How to calculate short circuit current] Moscow, 1983. 136 p.
3. Borisov P.A., Thomasov V.S. *Raschet i modelirovaniye vypryamiteley. Uchebnoye posobiye po kursu "Elementy sistem avtomatiki"* [Calculation and modeling of rectifiers. Textbook for the course "Elements of automation systems"]. Part I. St. Petersburg, 2009. 169 p.
4. Gerasimov A.I., Kuzmin S.V. *Elektrosnabzheniye predpriyatiy* [Power supply of enterprises] Krasnoyarsk, 2005. 150 p.
5. Grigoriev A.V., Vasiliev A.Yu., Kulagin Yu.A [Theoretical issues of calculating short-circuit currents in ship electrical power systems with direct current power distribution]. *Bulletin of the State University of Marine and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*, 2017, vol. 9, no. 5: 1095–1103. (In Russ.)
6. Barybina Yu.G. (Ed.) *Spravochnik po proyektirovaniyu elektrosnabzheniya* [Handbook on power supply design]. Moscow, 1990. 576 p.

7. State Standard 28249-93 *Korotkiye zamykaniya v elektroustanovkakh. Metody rascheta v elektroustanovkakh peremennogo toka napryazheniyem do 1 kV* [Short circuits in electrical installations. Calculation methods in AC electrical installations with voltage up to 1 kV]. Moscow, 2006. 45 p.
8. State Standard 15150-69 *Mashiny, pribory i drugiye tekhnicheskiye izdeliya ispolneniya dlya razlichnykh klimaticheskikh rayonov. Kategorii, usloviya ekspluatatsii, khraneniya i transportirovaniya v chasti vozdeystviya klimaticheskikh faktorov vneshney sredy* [Machines, instruments and other technical products designed for various climatic regions. Categories, conditions of operation, storage and transportation in terms of the impact of environmental climatic factors]. Moscow, 2010. 8 p.
9. State Standard 15543.1-89 *Izdeliya elektrotekhnicheskiye. Obshchiye trebovaniya v chasti stoykosti k klimaticheskim vneshnim vozdeystvuyushchim faktoram* [Electrical products general requirements in terms of resistance to external climatic influences]. Moscow, 2004. 7 p.
10. State Standard 29176-91 *Korotkiye zamykaniya v elektroustanovkakh. Metodika rascheta v elektroustanovkakh postoyannogo toka* [Short circuits in electrical installations. Calculation method for DC electrical installations]. Moscow, 2004. 36 p.
11. State Standard 50783-95 *Elektroagregaty i peredvizhnyye elektrostantsii s dvigatelyami vnutrennego sgoraniya* [Electrical units and mobile power plants with internal combustion engines]. Moscow, 1995. 25 p.
12. Technical Specifications 16.K71-370-2007 *Provoda s kremniyorganicheskoy izolyatsiyey i obolochkoy povyshennoy pozharobezopasnosti dlya podvizhnogo sostava rel'sovogo transporta* [Wires with silicone insulation and increased fire safety sheath for rolling stock of rail transport].
13. Pellegrino G., Armando E. and Guglielmi P. Direct Flux Field-Oriented Control of IPM Drives With Variable DC Link in the Field-Weakening Region. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2009, vol. 45, no. 5: 1619–1627.
14. Kwak S., Moon U.C. and Park J.C. Predictive-Control-Based Direct Power Control With an Adaptive Parameter Identification Technique for Improved AFE Performance. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, vol. 29, no. 11: 6178–6187.
15. Dannehl J., Wessels C. and Fuchs F.W. Limitations of Voltage-Oriented PI Current Control of Grid-Connected PWM Rectifiers With LCL Filters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, vol. 56, no. 2: 380–388.
16. Malinowski M., Jasinski M. and Kazmierkowski M.P. Simple direct power control of three-phase PWM rectifier using space-vector modulation (DPC-SVM). *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, vol. 51, no. 2: 447–454.
17. Song Z., Tian Y., Chen W., Zou Z. and Chen Z. Predictive Duty Cycle Control of Three-Phase Active-Front-End Rectifiers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, vol. 31, no. 1: 698–710.
18. Rodriguez J. Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, vol. 54, no. 1: 495–503.
19. Wang F., Li S., Mei X., Xie W., Rodríguez J. and Kennel R.M. Model-Based Predictive Direct Control Strategies for Electrical Drives: An Experimental Evaluation of PTC and PCC Methods. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, vol. 11, no. 3: 671–681.
20. Stando D., Kaźmierkowski M.P. and Chudzik P. Sensorless predictive torque control of induction motor drive operating in wide speed range – Simulation study. *16th Int. Power Electronics and Motion Control Conf. and Exposition*, 2014: 521–526.
21. Godlewska A., Grodzki R., Falkowski P., Korzeniewski M., Kulikowski K. and Sikorski A. Advanced Control Methods of DC/AC and AC/DC Power Converters – Look-Up Table and Predictive Algorithms. *Advanced Control of Electrical Drives and Power Electronic Converters*, 2017: 221–302. DOI:10.1007/978-3-319-45735-2_10
22. Scoltock J., Geyer T. and Madawala U. Model Predictive Direct Current Control for a grid-connected converter: LCL-filter versus L-filter. *2013 IEEE Int. Conf. on Industrial Technology (ICIT)*, 2013: 576–581.
23. Krein P.T., Balog R.S. and Mirjafari M. Minimum energy and capacitance requirements for single-phase inverters and rectifiers using a ripple port. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2012, vol. 27: 4690–4698.

24. Wang H., Chung H.S.H. and Liu W. Use of a series voltage compensator for reduction of the dc-link capacitance in a capacitor-supported system. *IEEE Trans. Power Electron*, 2014, vol. 29, no. 3: 1163–1175.

Информация об авторах

Дубовик Дмитрий Васильевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра ФН-7 «Электротехника и промышленная электроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; dubovikdv@bmstu.ru

Голубчик Тимофей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, кафедра ФН-7 «Электротехника и промышленная электроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; golubchik@bmstu.ru

Дьяков Алексей Сергеевич, доктор технических наук, заведующий отделом СМ 3-2 «Колесные машины» НИИ «Специальное машиностроение»; профессор кафедры СМ9, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; diakov57@list.ru

Закиров Рамиль Агзамович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Процессы и машины обработки металлов давлением», директор института «Научно-исследовательский институт опытного машиностроения», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; zakirovra@susu.ru

Information about the authors

Dmitry V. Dubovik, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of FN-7 “Electrical Engineering and Industrial Electronics”, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia; dubovikdv@bmstu.ru

Timofey V. Golubchik, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of FN-7 “Electrical Engineering and Industrial Electronics”, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia; golubchik@bmstu.ru

Alexey S. Diakov, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department СМ 3-2 “Wheeled Machines” of the Research Institute “Special Mechanical Engineering”, Professor of the Department СМ9, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia; diakov57@list.ru

Ramil A. Zakirov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department “Processes and Machines of Metal processing by pressure”, Director of the Institute “Research Institute of Experimental Mechanical Engineering”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, zakirovra@susu.ru

Статья поступила в редакцию 12.09.2023; принята к публикации 26.10.2023.
The article was submitted 12.09.2023; accepted for publication 26.10.2023.