

Григорьев Н. П., Ковалев В. А., Копай И. Г.
N. P. Grigoriev, V. A. Kovalev, I. G. Kopyay

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО И ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

INCREASING THE EFFICIENCY OF INTERACTION BETWEEN TRACTION AND EXTERNAL POWER SUPPLY SYSTEMS

Григорьев Николай Потапович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: 0101gnp@mail.ru.

Nikolay P. Grigoriev – Ph.D. (Eng.), Professor, Electric Power Supply Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: 0101gnp@mail.ru.

Ковалев Владимир Александрович – аспирант кафедры «Системы электроснабжения» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: kovalevv.a.2011@mail.ru.

Vladimir A. Kovalev – Postgraduate Student, Electric Power Supply Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: kovalevv.a.2011@mail.ru.

Копай Игорь Геннадьевич – старший преподаватель Приморского института железнодорожного транспорта – филиала Дальневосточного государственного университета путей сообщения в г. Уссурийске (Россия, Уссурийск). E-mail: kopyay@primizt.ru.

Igor G. Kopyay – Senior Lecturer, Primorsky Institute of Railway Transport – a Branch of Far Eastern State Transport University in Ussuriysk (Russia, Ussuriysk). E-mail: kopyay@primizt.ru.

Аннотация. Статья посвящена актуальному вопросу повышения эффективности взаимодействия системы тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ с системой внешнего электроснабжения. Системы тягового и внешнего электроснабжения являются динамическими электрически связанными системами и взаимодействуют в целях электрообеспечения перевозочного процесса. Программы стратегического развития железных дорог предусматривают увеличение объёмов перевозок грузов и пассажиров при условии полного и надёжного энергообеспечения электроподвижного состава с минимальными потерями электроэнергии. При этом оперативные переключения в системе внешнего электроснабжения могут оказывать влияние на показатели работы в системе тягового электроснабжения (напряжения на токоприёмниках поездов, потери электроэнергии и др.). Повышение эффективности деятельности системы тягового электроснабжения предложено выполнить переходом от существующего «реактивного» способа управления показателями работы к встречному интервальному с выбором «нормальных схем питания тяговых нагрузок» на прогнозные интервалы времени. Учёт взаимосвязи систем внешнего и тягового электроснабжения при определении перспективных интегральных показателей работы предложено выполнить входными и взаимными сопротивлениями узлов подключения тяговых подстанций к ЛЭП. В целях повышения точности результатов прогнозных показателей взаимодействия систем и синтеза рациональных схем питания тяговых нагрузок определяются действительные значения входных и взаимных сопротивлений узлов системы внешнего электроснабжения. Разработано автоматизированное рабочее место расчёта входных и взаимных сопротивлений системы внешнего электроснабжения, питающей систему тягового электроснабжения ДВЖД. Результаты расчёта показали высокую разность модулей и аргументов входных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций к системе внешнего электроснабжения. Доказана целесообразность учёта действительных значений входных и взаимных сопротивлений системы внешнего электроснабжения при анализе и синтезе нормальных схем питания тяговых нагрузок.

Summary. the article is devoted to the topical issue of increasing the efficiency of interaction between the traction power supply system of electrified railways with alternating current 25 kV and the external power supply system. Traction and external power supply systems are dynamic, electrically connected systems and interact for the purpose of electrical supply of the transportation process. Strategic development programs for railways provide for an increase in the volume of transportation of goods and passengers, subject to the complete and reliable power supply of electric rolling stock with minimal power losses. At the same time, operational switching in the external power

supply system can affect the performance in the traction power supply system (voltage on train pantographs, power losses, etc.). Improving the efficiency of the traction power supply system is proposed to be performed by switching from the existing «reactive» method of managing performance indicators to the opposite interval method, choosing «normal traction load power supply schemes» for predicted time intervals. It is proposed to take into account the interconnection of external and traction power supply systems when determining promising integral performance indicators by the input and mutual resistances of the traction substations connection nodes to power transmission lines. In order to improve the accuracy of the results of predictive indicators of the interaction of systems and the synthesis of rational schemes for supplying traction loads, the actual values of the input and mutual resistances of the nodes of the external power supply system are determined. An automated workplace for calculating the input and mutual resistances of the external power supply system that feeds the traction power supply system of the Far Eastern Railway has been developed. The results of the calculation showed a high difference between the modules and arguments of the input resistances of the traction substation connection units to the external power supply system. The expediency of taking into account the actual values of the input and mutual resistances of the external power supply system in the analysis and synthesis of normal power supply circuits for traction loads is proved.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, система внешнего электроснабжения, входные сопротивления, взаимные сопротивления, встречное интервальное регулирование, нормальные схемы, потери электроэнергии.

Key words: traction power supply system, external power supply system, input resistances, mutual resistances, counter interval regulation, normal circuits, power losses.

УДК 621.331:625.1:004.9

Системы тягового (СТЭ) и внешнего (СВЭ) электроснабжения взаимодействуют в целях электрообеспечения выполнения графика движения поездов. Перспективные условия функционирования электрифицированных железных дорог (ЭЖД), определённые стратегическими программами [1–3], предусматривают повышение эффективности деятельности СТЭ в условиях роста объёмов грузоперевозок.

Ключевым требованием программ стратегического развития железных дорог является полное и надёжное энергетическое обеспечение перевозочного процесса с минимальными потерями электроэнергии. Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» [1] предусматривает снижение потерь электрической энергии при передаче её от СВЭ до электроподвижного состава (ЭПС).

Одной из главных задач участия СВЭ в процессе электрообеспечения перевозочного процесса является обеспечение соответствия фактического уровня напряжения в узлах подключения тяговых подстанций СТЭ к электрическим сетям СВЭ нормативным значениям. С другой стороны, СВЭ обеспечивает электроснабжение районных нагрузок, динамика которых, как правило, существенно отличается от однофазных тяговых нагрузок ЭПС. Регулирование напряжения в узлах подключения районных потребителей выполняется независимо от ситуации в СТЭ.

Изменение топологии и сопротивлений ветвей СВЭ выполняется изменением положения коммутационных аппаратов [4; 5] и учитывается регулированием напряжения в узлах подключения тяговых подстанций СТЭ и подстанций районных потребителей к СВЭ.

В целях обеспечения нормативного уровня напряжения в узлах подключения нагрузок к электрическим сетям в СТЭ может применяться встречное регулирование напряжения. Встречное регулирование является перспективным и выполняется устройствами автоматики в соответствии с графиком движения поездов и прогнозных значений напряжений узлов. Выбор прогнозных ступеней устройств регулирования напряжения выполняется таким образом, чтобы обеспечивать нормативный уровень напряжения в узлах подключения потребителей к электрическим сетям и токоприёмников ЭПС.

В целях повышения эффективности деятельности СТЭ в работах [7–9] предлагается осуществить переход от существующего способа управления показателями работы СТЭ к прогнозному, при котором обеспечивается выполнение графика движения поездов выбором «нормальных схем

питания тяговых нагрузок» на перспективные интервалы времени. Алгоритм определения интервалов времени при переходе от реактивного управления показателями работы ЭлЖД к встречному интервальному представлен в работе [7]. Целесообразность нового понятия «нормальные схемы питания тяговых нагрузок» и критерии их определения предложены и обоснованы в работах [8; 9].

Обеспечение электроснабжения выполнения графика движения поездов осуществляется регулированием напряжения в тяговой сети на прогнозные интервалы времени выбором нормальных схем питания тяговых нагрузок. Нормальная схема питания тяговых нагрузок в интервале времени учитывает следующие факторы, влияющие на показатели работы СТЭ:

1. Степень устройств регулирования напряжения силовых трансформаторов тяговых подстанций (РПН).
2. Ступени устройств продольной (УПК) и поперечной (КУ) ёмкостной компенсации.
3. Количество силовых трансформаторов для питания ЭПС (тяговых трансформаторов), включённых на параллельную работу.
4. Схему питания тяговой сети.

Поскольку системы тягового и внешнего электроснабжения являются электрически связанными, оперативные переключения в СВЭ оказывают влияние на показатели работы СТЭ (напряжение в тяговой сети, потери электрической энергии и др.) и значения входных и взаимных сопротивлений в узлах подключения тяговых подстанций к электрическим сетям СВЭ [5].

Узел СВЭ определяется точкой присоединения вводов распределительных устройств электростанции, тяговой или районной подстанции к электрическим сетям СВЭ. Входные и взаимные сопротивления СВЭ являются одним из показателей взаимодействия систем внешнего и тягового электроснабжения и определяют влияние топологии, сопротивлений ветвей и нагрузок СВЭ на напряжения в узлах подключения тяговых подстанций к электрическим сетям.

Входное сопротивление узла i Z_{ii} соответствует отношению падения напряжения $\Delta \dot{U}_i$ от тока нагрузки \dot{I}_i этого же узла и характеризует влияние нагрузок, подключённых к узлу i , на напряжение узла. Взаимное сопротивление узлов i и j Z_{ij} соответствует отношению падения напряжения в узле i $\Delta \dot{U}_i$ от тока узла j \dot{I}_j и характеризует влияние нагрузок смежных узлов на напряжение в узле i .

Передача электроэнергии от электрических станций до СТЭ обеспечивается трёхфазными ЛЭП и силовыми трансформаторами (автотрансформаторами) подстанций, комплексные сопротивления фаз которых, как правило, симметричны. В этой связи входные и взаимные сопротивления узлов подключения тяговых подстанций к электрическим сетям СВЭ имеют одинаковые значения модулей и аргументов по фазам А, В и С. Падения напряжения в узлах подключения тяговых подстанций к СВЭ зависят от модулей и аргументов токов плеч подстанций и значений входных сопротивлений узлов.

Токи плеч питания тяговых нагрузок тяговых подстанций распределяются в обмотках тяговых трансформаторов в соотношении $2/3$ и $-1/3$, причём $2/3$ относится к обмотке, напряжение которой совпадает с напряжением плеча [6]. Однофазные тяговые нагрузки СТЭ создают несимметрию токов обмоток тяговых трансформаторов и фаз СВЭ [6]. Несимметрия токов в СВЭ от тяговых нагрузок СТЭ повышает потери электроэнергии в электрических сетях при передаче её от электростанций до ЭПС и увеличивает несимметрию напряжений в узлах подключения потребителей к СВЭ.

Токи обмоток тягового трансформатора определяют токи фаз узлов подключения тяговых подстанций к СВЭ. Падение напряжения в фазе узла подключения тяговой подстанции i к СВЭ определим по формуле

$$\Delta \dot{U}_i = \dot{I}_i Z_{ii},$$

где \dot{I}_i – ток фазы в узле подключения тяговой подстанции i к СВЭ; Z_{ii} – входное сопротивление узла подключения тяговой подстанции i к СВЭ, приведённое к базисному напряжению.

Падения напряжения в узлах подключения тяговых подстанций к СВЭ понижают модуль напряжения на тяговых шинах подстанций. Пониженное напряжение на тяговых шинах создаёт риск нарушения нормативного уровня напряжения на токоприёмниках ЭПС.

Несимметричные токи фаз от тяговых подстанций создают несимметричные падения напряжений на симметричных входных сопротивлениях узлов подключения подстанций к электрическим сетям и повышают несимметрию напряжений в узлах СВЭ. Неравенство модулей и (или) аргументов входных сопротивлений смежных тяговых подстанций и токов фаз приводит к возникновению разности напряжений узлов подключения смежных тяговых подстанций к фазам ЛЭП и повышает потери в фазах ЛЭП, стали и меди силовых трансформаторов и обуславливает протекание уравнивающих токов в СТЭ и СВЭ.

Уравнивающие токи распределяются по фазам обмоток тяговых трансформаторов и электрических сетей СВЭ в соотношении $2/3$ и $-1/3$ [6], повышают несимметрию токов и напряжений, потери электроэнергии в ЛЭП и силовых трансформаторах СВЭ и тяговой сети СТЭ. Протекание уравнивающих токов в СВЭ вызывает дополнительный нагрев проводов ЛЭП и обмоток силовых трансформаторов, что снижает пропускную способность линий, повышает интенсивность износа изоляции и сокращает срок службы электрооборудования.

Применение входных и взаимных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций к СВЭ при выборе рациональных ступеней устройств регулирования показателей работы СТЭ рассмотрено в работах отечественных учёных и специалистов в области электроснабжения железных дорог [10–12].

Методика выбора ступеней РПН с учётом значений входных и взаимных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций к СВЭ предложена в работе [13]. Доказано, что рациональный выбор ступени РПН с учётом входных и взаимных сопротивлений узлов обеспечивает снижение потерь электроэнергии в тяговой сети.

Влияние входных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций к СВЭ на выбор ступени КУ рассмотрено в работе [10]. Доказано, что выбор рациональной ступени КУ с учётом входного сопротивления снижает негативное влияние однофазных тяговых нагрузок на качество электрической энергии в СВЭ и обеспечивает снижение потерь электрической энергии в СТЭ. Влияние входных сопротивлений узлов СВЭ на выбор ступени УПК в интервалах времени, а также на напряжение и уравнивающий ток в контактной сети рассмотрено в работах [14; 15].

В работе [16] представлена методика расчёта уравнивающего тока в контактной сети межподстанционных зон СТЭ переменного тока 25 кВ. Для расчёта значения уравнивающего тока в данной методике предложен системный подход и применение в исходных данных значений входных и взаимных сопротивлений узлов СВЭ.

В работах [11; 12] отмечено, что неучёт значений взаимных сопротивлений тяговых подстанций может вносить существенную погрешность при расчётах показателей работы СТЭ (при расчёте напряжений 3-15 %, уравнивающего тока – 15-50 %, потерь мощности – 5-20 %, токов короткого замыкания – до 50 %). Таким образом, применение перспективных значений входных и взаимных сопротивлений узлов СВЭ повышает точность анализа и синтеза нормальных схем питания тяговых нагрузок при встречном интервальном регулировании.

Значения входных и взаимных сопротивлений узлов СВЭ зависят от топологии действительных схем и сопротивлений ветвей, прогнозное состояние которых известно оперативным работникам, как правило, на перспективный период. Оперативные переключения, выполняемые в целях выполнения ремонтных работ, технического обслуживания электрооборудования и организации рационального режима работы СВЭ, выполняются по плану. Перспективная топология и сопротивления ветвей могут быть определены с высокой точностью на прогнозные интервалы времени.

В целях повышения точности результатов анализа перспективного взаимодействия систем внешнего и тягового электроснабжения ДВЖД и синтеза рациональных схем питания тяговых нагрузок разработано автоматизированное рабочее место (АРМ РВВС), позволяющее определять

комплексные динамические значения входных и взаимных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций ДВЖД к СВЭ [17].

АРМ РВВС содержит базу данных (БД) ЛЭП и силовых трансформаторов (автотрансформаторов) подстанций СВЭ, а также паспортных данных проводов и трансформаторов, эксплуатируемых в СВЭ, питающей СТЭ ДВЖД. Принятая расчётная схема СВЭ включает трансформаторные подстанции 110 кВ (182 ед.), 220 кВ (41 ед.), 500 кВ (5 ед.), звенья ЛЭП 110 кВ (326 ед.), 220 кВ (93 ед.), 500 кВ (6 ед.).

БД АРМ обеспечивает хранение и актуализацию параметров 425 звеньев из 520 цепей ЛЭП СВЭ, а также данные 73 автотрансформаторов и 419 трансформаторов, эксплуатируемых на 228 трансформаторных подстанциях и 13 электростанциях.

Информация о состоянии звеньев ЛЭП и силовых трансформаторов (автотрансформаторов) СВЭ хранится в БД в виде матриц. Матрицы содержат следующие данные о состоянии электрооборудования СВЭ во времени расчётной мгновенной схемы:

1. Для звеньев ЛЭП: номера звеньев ЛЭП j , начального n_j и конечного k_j номеров узлов, класс напряжения U_j , тип провода $t_{прj}$, протяжённость l_j и состояние ОС $_{лj}$ (включено в работу – 1, отключено – 0) j -го звена ЛЭП, количество цепей в j -м звене q_j , количество проводов в фазе q -й цепи j -го звена $N_{прj,q}$, ($q=1, \dots, q_j$), температуру q -й цепи j -го звена $t_{лэпj,q}$.

2. Для силовых трансформаторов (автотрансформаторов) подстанций: порядковые номера подстанций i , количество трансформаторов i -й подстанции q_i , индекс трансформатора q , тип трансформатора $t_{трj,q}$, температуру нагрева обмоток $t_{трj,q}$, ступень РПН $n_{рпнi,q}$ и состояние q -го трансформатора i -й подстанции ОС $_{трj,q}$ (включён в работу – 1, отключён – 0).

Матрицы паспортных данных электрооборудования СВЭ содержат данные 64 типов проводов ЛЭП, 44 типов трансформаторов и 6 типов автотрансформаторов СВЭ питающей СТЭ ДВЖД, классов напряжения 110, 220 и 500 кВ.

В целях учёта сетевого развития СВЭ в БД предусмотрена возможность актуализации количества ЛЭП, трансформаторных подстанций, силовых трансформаторов (автотрансформаторов) действующих подстанций, а также номенклатуры проводов и трансформаторного оборудования при применении новых типов проводов и трансформаторов в СВЭ.

Система управления базой данных (СУБД) АРМ обеспечивает возможность обмена данными с системным оператором СВЭ в целях определения перспективных топологии и сопротивлений ветвей СВЭ в интервалах времени при расчёте значений входных и взаимных сопротивлений [17]. В качестве системного оператора, например, для Дальневосточного региона, выступает ОДУ Востока, которое обеспечивает оперативно-диспетчерское управление режимами работы энергосистем Хабаровского, Приморского краёв, Амурской области и ЕАО, в границах которых расположена СТЭ ДВЖД.

В целях учёта динамики топологии и сопротивлений ветвей СВЭ в перспективных интервалах времени при встречном интервальном регулировании АРМ обеспечивает определение значений сопротивлений ветвей СВЭ с учётом прогнозных количества ЛЭП и трансформаторов подстанций в работе, температуры нагрева проводов ЛЭП и обмоток трансформаторов (автотрансформаторов), а также коэффициентов трансформации трансформаторов (автотрансформаторов).

АРМ РВВС позволяет определять прогнозные комплексные значения входных и взаимных сопротивлений узлов СВЭ с учётом действительных перспективных топологии и сопротивлений ветвей СВЭ. Статистическая обработка данных позволяет определить динамику изменения значений входных и взаимных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций к ЛЭП СВЭ в интервалах времени при встречном интервальном регулировании в целях энергообеспечения выполнения графика движения поездов и снижения потерь электрической энергии [5].

По результатам расчётов значений входных и взаимных сопротивлений 32 тяговых подстанций ДВЖД установлено:

1. Диапазон изменения модулей входных сопротивлений (приведённые к тяговому напряжению) составил от 0,216 до 3,26 Ом, аргументов – от 60,23 до 84 град. эл. Среднее значение мо-

дулей входных сопротивлений тяговых подстанций ДВЖД составляет 1,15 Ом, аргументов – 73,7 град. эл.

2. Отклонение модуля входного сопротивления превышает 20 % для 22 (68 %) тяговых подстанций ДВЖД. Наибольшее отклонение модуля от среднего значения определено для ТП «Дальнереченск» (в 1,8 раза).

3. Отклонение аргумента входного сопротивления превышает 5 % для 29 (90 %) тяговых подстанций ДВЖД. Наибольшее отклонение аргумента от среднего значения определено для ТП «Первая речка» (18 %).

Полученные результаты свидетельствуют о высокой разности модулей и аргументов входных сопротивлений смежных тяговых подстанций ДВЖД. Определение действительных значений входных и взаимных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций к СВЭ с учётом действительных топологии и сопротивлений ветвей повышает точность определения интегральных показателей работы СТЭ при анализе и синтезе нормальных схем питания тяговых нагрузок.

Выводы:

1. Выполнен анализ взаимодействия систем внешнего и тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ. Доказано, что изменение значений входных и взаимных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций к электрическим сетям системы внешнего электроснабжения может оказывать влияние на показатели работы СТЭ (напряжение на токоприёмниках ЭПС, потери электроэнергии и др.).

2. Обоснована необходимость учёта действительных значений входных и взаимных сопротивлений при анализе и синтезе нормальных схем питания тяговых нагрузок при встречном интервальном регулировании показателей работы системы тягового электроснабжения. Применение прогнозных входных и взаимных сопротивлений обеспечивает учёт взаимосвязи систем внешнего и тягового электроснабжения при определении прогнозных интегральных значений показателей работы в расчётных интервалах.

3. Разработанный АРМ РВВС позволяет учесть динамику топологии и сопротивлений ветвей системы внешнего электроснабжения при определении прогнозных значений входных и взаимных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций к электрическим сетям.

4. На примере системы тягового электроснабжения Дальневосточной железной дороги доказана высокая разность модулей и аргументов входных сопротивлений узлов подключения смежных тяговых подстанций к системе внешнего электроснабжения. Полученные результаты подтверждают необходимость учёта комплексных значений входных и взаимных сопротивлений узлов подключения тяговых подстанций к фазам ЛЭП при нормализации схем питания тяговых нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от «15» декабря 2011 г. № 2718р // Инновационный дайджест РЖД. – URL: http://www.rzd-expo.ru/doc/Energ_Strateg_new.pdf (дата обращения: 01.08.2022). – Текст: электронный.
2. Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и перспективу до 2025 года (Белая книга) / ОАО «РЖД». – URL: <https://clck.ru/35fyhQ> (дата обращения: 30.08.2023). – Текст: электронный.
3. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. №3363-р // Правительство России, официальный сайт. – URL: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZlOOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf> (дата обращения: 01.08.2022). – Текст: электронный.
4. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчётов / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
5. Grigoriev N. P. An algorithm of calculating the input and mutual resistances of the external electric power supply system / N. P. Grigoriev, V. A. Tikhomirov, P. N. Trofimovich [et al.] // Proceedings II International Scien-

- tific Conference on Advances in Science, Engineering and Digital Education (ASEDU-II-2021): Conference Proceedings, Krasnoyarsk, 28 октября 2021 года. Vol. 2647 A. – Krasnoyarsk: AIP PUBLISHING, 2021. – P. 60023.
6. Марквардт, К. Г. Энергоснабжение электрических железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1965. – 464 с.
 7. Власевский, С. В. Встречное регулирование показателей работы в системе тягового электроснабжения переменного тока / С. В. Власевский, Н. П. Григорьев, П. Н. Трофимович // Электротехника. – 2019. – № 7. – С. 50-53.
 8. Григорьев, Н. П. Нормальные схемы питания тяговых нагрузок / Н. П. Григорьев, С. А. Власенко, А. П. Парфианович // Повышение эффективности транспортной системы региона: проблемы и перспективы: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. В 3 т. Т. 2 / Под ред. С. М. Гончарука. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2015. – С. 63-69.
 9. Повышение энергоэффективности системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ / Н. П. Григорьев, М. С. Клыков, А. П. Парфианович, В. И. Шестухина // Электротехника. – 2016. – № 2. – С. 58-60.
 10. Бородулин, Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог / Б. М. Бородулин, Л. А. Герман, Г. А. Николаев. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
 11. Герман, Л. А. Матричный метод расчёта системы тягового электроснабжения переменного тока с учётом системы внешнего электроснабжения / Л. А. Герман // Наука и техника транспорта. – 2004. – № 4. – С. 70-77.
 12. Герман, Л. А. Сравнение методов расчёта системы тягового электроснабжения при разных способах учёта параметров внешней сети / Л. А. Герман, К. В. Кишкурно // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2013. – № 1. – С. 16-21.
 13. Герман, Л. А. Автоматическое регулирование напряжения трансформаторов тяговых подстанций переменного тока / Л. А. Герман, Д. А. Куров // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2012. – № 1. – С. 19-26.
 14. Герман, Л. А. Регулируемые установки ёмкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог: учеб. пособие / Л. А. Герман. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. – 316 с.
 15. Григорьев, Н. П. Повышение эффективности работы системы тягового электроснабжения устройствами продольной компенсации / Н. П. Григорьев, П. Н. Трофимович // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – № 3. – С. 64-68.
 16. Марквардт, Г. Г. Расчёт уравнивающих токов в тяговой сети / Г. Г. Марквардт, Н. П. Григорьев, М. Г. Демин // Электричество. – 1984. – Вып. 10. – С. 50-52.
 17. Григорьев, Н. П. Автоматизированное рабочее место расчёта входных и взаимных сопротивлений системы внешнего электроснабжения / Н. П. Григорьев, В. А. Ковалев // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2021. – № 1 (26). – С. 54-60.