

## **Содержание**

*Электротехника, 2024, №9, стр. 2-8*

### **DC-DC преобразователь в составе управляемого стационарного накопителя энергии в системе тягового электроснабжения метрополитена**

**БЕСТЕМЬЯНОВ П.Ф., БЕЛОВ М.Н.**

Управляемые накопители энергии являются перспективным методом повышения эффективности систем тягового электроснабжения. Преобразователь постоянного напряжения – неотъемлемая часть конструкции накопителя, необходимая для согласования работы накопителя с системой тягового электроснабжения и выполнения алгоритмов управления. В статье рассмотрены несколько схем преобразователя, систем генерации управляющих сигналов, а также предложены их математические имитационные модели, выполненные с помощью пакета MATLAB Simulink, библиотеки SimPowerSistems.

**Ключевые слова:** метрополитен, система тягового электроснабжения, накопители энергии, DC-DC преобразователи, энергоэффективность.

Controlled energy storage is a promising method of increasing the efficiency of traction power supply systems. The DC voltage converter is an integral part of the drive design, necessary to coordinate the operation of the drive with the traction power supply system and to perform control algorithms. The article discusses several converter circuits, control signal generation systems, and also offers their mathematical simulation models made using the MATLAB Simulink package, the SimPowerSistems library.

**Key words:** subway, traction power supply system, energy storage, DC-DC converters, energy efficiency.

*Электротехника, 2024, №9, стр.9-13*

### **Оптимальные параметры бортовых накопителей энергии электроподвижного состава метрополитена**

ПЛЕТНЕВ Д.С., БЕСТЕМЬЯНОВ П.Ф.

Предложена методика оценки параметров автономного хода электроподвижного состава, включающая анализ массы состава, скоростных режимов и напряжения бортовых накопителей энергии. Методика позволяет определить оптимальные характеристики накопителей для обеспечения аварийного и маневрового хода, учитывая параметры системы тягового электроснабжения и особенности эксплуатации метрополитена. Рассмотрен сценарий аварийного отключения электроэнергии, когда накопитель обеспечивает автономное движение состава к ближайшей станции для безопасной эвакуации пассажиров. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие эффективность использования накопителя для повышения надежности и безопасности эксплуатации метрополитена. Показано что применение накопителя на борту состава не только способствует эффективному повторному использованию энергии, но и повышает безопасность пассажиров в аварийных ситуациях. Предложенная методика оценки параметров накопителя учитывает реальные параметры системы тягового электроснабжения, что обеспечивает высокую точность и надежность расчетов.

**Ключевые слова:** метрополитен, система тягового электроснабжения, электроподвижной состав, бортовой накопитель энергии, энергоэффективность.

A method for estimating the parameters of the autonomous running of an electric rolling stock is proposed, including an analysis of the mass of the composition, speed modes and voltage of on-board energy storage devices. The technique allows us to determine the optimal characteristics of storage devices to ensure emergency and maneuvering, taking into account the parameters of the traction power supply system and the specifics of the operation of the subway. The scenario of an emergency power outage is considered, when the storage device provides autonomous movement of the train to the nearest station for the safe evacuation of passengers. Experimental data confirming the efficiency of using the storage device to improve the reliability and safety of subway operation are presented. It is shown that the use of a storage device on board the train not only contributes to the efficient reuse of energy, but also increases the safety of passengers in emergency situations. The proposed method for estimating the parameters of the storage device takes into account the real parameters of the traction power supply system, which ensures high accuracy and reliability of calculations.

**Key words:** subway, traction power supply system, electric rolling stock, on-board energy storage, energy efficiency.

### **Трёхпроводная система тягового электроснабжения метрополитена**

ГРЕЧИШНИКОВ В. А., ЩЕГЛОВ Р.В., БЕЛЕЦКИЙ С.В., ГАВРИКОВ В.Г.

Показано, что трёхпроводная схема питания системы тягового электроснабжения метрополитена только за счёт переподключения питающих линий повышает энергоэффективность метрополитена. Сокращение суммарного расхода электроэнергии тяговыми подстанциями на тестовом участке из семи тяговых подстанций в течение модельного времени, равного двум часам, составило 2,9 %, уменьшение потерь энергии в контактном и ходовом рельсах составило 6,3%, повышение минимального напряжения в тяговой сети составило 10–25 В. Эти свидетельствуют о перспективности дальнейшего изучения данной системы, проработки вопросов модификации электроподвижного состава для защиты от переполюсовки и работы устройств сигнализации, централизации и блокировки.

**Ключевые слова:** метрополитен, система тягового электроснабжения, тяговая подстанция, трёхпроводная схема питания, энергоэффективность.

It is shown that the three-wire power supply scheme of the traction power supply system of the subway increases the energy efficiency of the subway only by reconnecting the supply lines. The reduction in total electricity consumption by traction substations in the test section of seven traction substations during the model time equal to two hours was 2.9%, the reduction in energy losses in the contact and running rails was 6.3%, the increase in the minimum voltage in the traction network was 10-25 V. These indicate the prospects for further study of this system, working out the issues of modification of electric rolling stock to protect against reverse polarity and operation of alarm, centralization and blocking devices.

**Key words:** subway, traction power supply system, traction substation, three-wire power supply circuit, energy efficiency.

### **О повышении энергетической эффективности централизованного электроснабжения Московского метрополитена**

БЕЛЕЦКИЙ С.В., ГРЕЧИШНИКОВ В.А., КОВАЛЕВ К.Л., ШЕВЛЮГИН М.В.

На примере системы тягового электроснабжения Арбатско-Покровской линии Московского метрополитена рассмотрена целесообразность перевода с двухсторонней раздельной схемы электроснабжения тяговой сети на узловую схему посредством

установки постов секционирования и пунктов параллельного соединения. Выполнен анализ тяговой сети на предмет возможности подключения постов секционирования. За критерии были приняты протяженность межподстанционных зон с централизованной системой электроснабжения, а также свободные площади в наземной и, особенно, в подземной частях метрополитена. Выбраны два наиболее подходящих участка тяговой сети на межподстанционных зонах подстанций. Выполнено имитационное моделирование работы системы тягового электроснабжения Арбатско-Покровской линии без постов секционирования и с их использованием на выбранных участках тяговой сети.

Представлены данные по электроэнергетическим расходам тяговых подстанций, а также по потерям электроэнергии в тяговой сети при различных схемах электроснабжения.

Приведены осциллограммы напряжения электроподвижного состава в функции времени при различных схемах электроснабжения тяговой сети. При статистической обработке выявлено, что в совокупности по двум путям эффект от использования постов секционирования по уровню напряжения мало заметен. По результатам статистической обработки данных имитационного моделирования показан технико-экономический эффект от использования постов секционирования на двух межподстанционных зонах.

**Ключевые слова:** метрополитен, система тягового электроснабжения, секционирование тяговой сети, пост секционирования, пункт параллельного соединения.

Using the example of the traction power supply system of the Arbatsko-Pokrovskaya line of the Moscow Metro, the expediency of transferring from a two-way separate power supply scheme of the traction network to a node scheme by installing sectioning posts and parallel connection points is considered. The analysis of the traction network for the possibility of connecting the sectioning posts was performed. The criteria were taken as the length of inter-substation zones with a centralized power supply system, as well as free areas in the above-ground and, especially, in the underground parts of the subway. Two most suitable sections of the traction network in the substation inter-substation zones have been selected. A simulation simulation of the operation of the traction power supply system of the Arbatsko-Pokrovskaya line without partitioning posts and using them on selected sections of the traction network was performed. Data on electric power consumption of traction substations, as well as on electricity losses in the traction network under various power supply schemes are presented. The oscillograms of the voltage of an electric rolling stock in a function of time for various power supply schemes of the traction network are given. Statistical processing revealed that, in combination, in two ways, the effect of using partitioning posts in terms of voltage level is not noticeable. Based on the results of statistical processing of simulation data, the technical

and economic effect of using partitioning posts in two substation zones is shown.

**Key words:** metro, traction power supply system, partitioning of the traction network, partitioning post, parallel connection point.

*Электротехника, 2024, №9, стр. 25-31*

**Энергетические характеристики электропривода с системой прямого управления моментом синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов**

ИНЬКОВ Ю.М., КОСМОДАМИАНСКИЙ А.С., ПУГАЧЕВ А.А., ЧУПРИНА Н.В.

Показана актуальность разработки и исследования систем прямого управления моментом синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ).

Математическое описание работы электропривода выполнено в двухфазной системе координат, в которой приведена эквивалентная схема замещения СДПМ, учитывающая потери в магнитопроводе статора и магнитах ротора. Приведены результаты компьютерного моделирования энергетических характеристик двух типов СДПМ (с одинаковыми и разными индуктивностями статора по осям  $dq$ ) в составе электропривода с системой прямого управления моментом, в качестве которых выбрана зависимость тока обмотки статора от потокосцепления статора. Установлен экстремальный характер этих зависимостей. Для двух типов магнитной системы СДПМ выведены алгебраические выражения для определения задания на потокосцепление статора, обеспечивающие минимум тока обмотки статора. Разработан алгоритм поиска минимума тока обмотки статора с помощью дополнительных сигналов задания на потокосцепление. Приведена функциональная схема электропривода с системой прямого управления моментом СДПМ, содержащая ПИ-регуляторы в контурах регулирования момента и потокосцепления, выходные сигналы которых являются задающими для системы пространственно-векторной модуляции напряжения обмотки статора. Приведены результаты моделирования электропривода с предложенными алгебраическими выражениями и разработанным алгоритмом поиска задания на потокосцепление, обеспечивающим минимум тока обмотки статора. Установлена работоспособность всех предложенных решений, при этом поисковый алгоритм одинаков для обоих типов СДПМ и обеспечивает минимизацию тока обмотки статора в обеих зонах регулирования, в то время как алгебраические выражения задания на потокосцепление статора отличаются для разных типов СДПМ и обеспечивают минимум тока обмотки статора не во всем диапазоне изменения частоты вращения.

**Ключевые слова:** электропривод, система прямого управления моментом, синхронный двигатель, постоянные магниты, пространственно-векторная модуляция, моделирование.

The relevance of the development and research of systems for direct torque control of a synchronous motor with excitation from permanent magnets (SMPM) is shown. The mathematical description of the operation of the electric drive is performed in a two-phase coordinate system, which shows an equivalent SMPM replacement circuit that takes into account losses in the stator magnetic circuit and rotor magnets. The results of computer simulation of the energy characteristics of two types of SMPM (with the same and different inductors of the stator along the  $dq$  axes) are presented as part of an electric drive with a direct torque control system, the dependence of the stator winding current on the flow coupling of the stator is selected. The extreme nature of these dependencies has been established. For two types of magnetic SMPM system, algebraic expressions are derived to determine the stator flow coupling task, providing a minimum of the stator winding current. An algorithm has been developed to find the minimum current of the stator winding using additional signals for flow coupling. A functional diagram of an electric drive with a direct torque control system SMPM is presented, containing PI regulators in the torque control and flow coupling circuits, the output signals of which are the setting signals for the system of spatial vector modulation of the voltage of the stator winding. The results of modeling an electric drive with the proposed algebraic expressions and the developed algorithm for searching for a flow coupling task that provides a minimum of the stator winding current are presented. The operability of all proposed solutions has been established, while the search algorithm is the same for both types of stator coils and minimizes the current of the stator winding in both control zones, while the algebraic expressions of the stator flow coupling task differ for different types of stator coils and provide a minimum of the stator winding current not in the entire frequency range.

**Key words:** electric drive, direct torque control system, synchronous motor, permanent magnets, spatial vector modulation, modeling.

*Электротехника, 2024, №9, стр. 32-36*

### **Сравнительная характеристика автономных инверторов напряжения для источников бесперебойного питания**

КОСМОДАМИАНСКИЙ А.С., ИНЬКОВ Ю.М., ПУГАЧЕВ А.А., СИРОТСКИЙ М.С.

Показана актуальность разработки и исследования трехуровневых автономных инверторов напряжения (АИН) для трехфазных промышленных источников

бесперебойного питания (ИБП). Установлено, что наиболее перспективными для применения в составе ИБП являются трехуровневые АИН с фиксирующими диодами и АИН Т-типа. Приведены структуры одной фазы АИН с фиксирующими диодами и АИН Т-типа, дано математическое описание функций переключения полупроводниковых ключей этих инверторов, в том числе обеспечивающих уменьшение коммутационных потерь в динамических режимах для полупроводников АИН Т-типа. В качестве критериев сравнения эффективности работы АИН выбраны потери мощности в полупроводниковых ключах и коэффициент гармонических искажений выходного тока. Представлена математическая модель расчета потерь мощности в установившихся и динамических режимах работы и коэффициента гармонических искажений выходного тока. Приведены зависимости выбранных показателей качества работы АИН от частоты коммутации полупроводниковых ключей и коэффициента модуляции выходного напряжения для разных режимов работы и мощностей нагрузки. Установлено, что АИН Т-типа обеспечивает более эффективное преобразование электроэнергии во всем диапазоне изменения частот коммутации и коэффициента модуляции, при этом с ростом частоты коммутации разница в потерях мощности между АИН Т-типа и АИН с фиксирующими диодами возрастает; изменение разницы в потерях мощности от коэффициента модуляции выражено слабо. При применении синусоидальной широтно-импульсной модуляции напряжения оба рассматриваемых типа АИН показали одинаковую эффективность по критерию коэффициента гармонических искажений выходного тока, при этом их преимущество по отношению к двухуровневому АИН возрастает с уменьшением нагрузки и уменьшением частоты коммутации.

**Ключевые слова:** источник бесперебойного питания, автономный инвертор напряжения, синусоидальная модуляция, потери мощности, коэффициент гармонических искажений, компьютерное моделирование.

The relevance of the development and research of three-level autonomous voltage inverters (AIS) for three-phase industrial uninterruptible power supplies (UPS) is shown. It was found that the most promising for use in the UPS are three-level AIS with fixing diodes and T-type AIS. The structures of one phase of the AIN with locking diodes and the AIN T-type are given, a mathematical description of the switching functions of the semiconductor switches of these inverters is given, including those providing a reduction in switching losses in dynamic modes for the AIN T-type semiconductors. The power losses in semiconductor switches and the harmonic distortion coefficient of the output current were selected as criteria for comparing the efficiency of the AI. A mathematical model for calculating power losses in steady-state and

dynamic operating modes and the harmonic distortion coefficient of the output current is presented. The dependences of the selected indicators of the quality of the AI operation on the switching frequency of semiconductor switches and the modulation coefficient of the output voltage for different operating modes and load capacities are shown. It was found that the T-type AIN provides more efficient conversion of electricity over the entire range of switching frequencies and modulation coefficient, while with increasing switching frequency, the difference in power losses between the T-type AIN and the AIN with locking diodes increases; the change in the difference in power losses from the modulation coefficient is weakly expressed. When using sinusoidal pulse-width voltage modulation, both types of AIS under consideration showed the same efficiency according to the criterion of the harmonic distortion coefficient of the output current, while their advantage over the two-level AIS increases with decreasing load and decreasing switching frequency.

**Key words:** uninterruptible power supply, autonomous voltage inverter, sinusoidal modulation, power loss, harmonic distortion coefficient, computer modeling.

*Электротехника, 2024, №9, стр. 37-42*

### **О методике исследования тягового электропривода локомотивов в режимах предельных усилий**

ФЕДЯЕВА Г.А., ИНЬКОВ Ю.М., ТАРАСОВ А.Н., ТАТУЙКО П.С., КИЕНДО К.Ж.

Рассмотрены проблема реализации электроприводом локомотивов предельных по сцеплению тяговых и тормозных усилий, причины возникновения автоколебательных процессов в тяговом тракте и приведены их результаты моделирования, дана классификация основных алгоритмов управления, используемых в режимах предельных усилий. Показана целесообразность и пояснены принципы совмещения программных комплексов для отработки на моделях алгоритмов управления электроприводом в режимах предельных усилий, обоснована перспективность развития методики моделирования на основе совмещения программных комплексов SimInTech и Universalmechanism.

**Ключевые слова:** тяговый электропривод, динамические нагрузки, защита от буксования, алгоритмы управления, моделирование, программные комплексы.

The problem of the implementation of traction and braking forces by an electric locomotive drive is considered, the causes of self-oscillatory processes in the traction tract and their modeling results are presented, the classification of the main control algorithms used in the



modes of marginal forces is given. The expediency is shown and the principles of combining software complexes for testing electric drive control algorithms in extreme effort modes on models are explained, the prospects for the development of modeling techniques based on the combination of SimInTech and Universalmechanism software complexes are substantiated.

**Key words:** traction electric drive, dynamic loads, slip protection, control algorithms, modeling, software complexes.

*Электротехника, 2024, №9, стр. 43-47*

### **Фотоэлектрическая панель как дополнительный источник энергоснабжения пассажирского вагона**

БУГЛАЕВ Н.А., ФЕДЯЕВА Г.А., ИНЬКОВ Ю.М., ТАТУЙКО П.С.

Рассмотрены типы систем электроснабжения пассажирских вагонов, приведена методика расчёта тока и мощности фотоэлектрической панели в зависимости от напряжения на выходе, выполнено моделирование для отечественной фотоэлектрической панели SIR330Вт-24 (5BB) PERC, доказана адекватность модели на основе сравнения результатов расчёта с технической документацией, построены зависимости выходных параметров фотоэлектрической панели от напряжения для различных условий окружающей среды, показана возможность использования фотоэлектрических панелей в качестве дополнительного источника питания пассажирского вагона

**Ключевые слова:** электроснабжение пассажирского вагона, отечественные фотоэлектрические панели, расчёт электроэнергии, моделирование.

The types of power supply systems for passenger cars are considered, a method for calculating the current and power of a photovoltaic panel depending on the output voltage is presented, modeling for the domestic SIR330W-24 (5BB) PERC photovoltaic panel is performed, the adequacy of the model is proved based on comparing the calculation results with technical documentation, the dependences of the output parameters of a photovoltaic panel on voltage for various environmental conditions are constructed Wednesday, the possibility of using photovoltaic panels as an additional power source for a passenger car is shown.

**Key words:** passenger car power supply, domestic photovoltaic panels, electricity calculation, modeling.

**Система теплового накопителя энергии на тяговой подстанции метрополитена для утилизации избыточной энергии рекуперации**

ОГАНОВ С.В., КОВАЛЕВ К.Л., ШЕВЛЮГИН М.В.

Приведены данные по оценке объемов избыточной энергии рекуперации в системе тягового электроснабжения Московского метрополитена и техническим средствам по ее утилизации с помощью различного рода накопителей энергии. Представлены конструкция теплового накопителя энергии и принципиальная схема его подключения к тяговой сети. Описаны основные элементы конструкции, системы управления, особенности хладагента и принцип работы всей системы теплового накопителя энергии. Используются результаты экспериментальных исследований стационарного накопителя электрической энергии для утилизации избыточной энергии рекуперации на действующей тяговой подстанции Московского метрополитена. Приведены осциллограммы тока и напряжения накопителя в режиме реального времени в течение суток, а также результаты статистической обработки энергозатрат. Приведена методика оценки средней электрической мощности потребления избыточной энергии рекуперации, которая в последующем преобразуется в тепловую энергию. На основании экспериментальных данных выполнена оценка возможной площади отопления помещений метрополитена за счет избыточной энергии рекуперации при торможении поездов.

**Ключевые слова:** тяговая сеть метрополитена, система тягового электроснабжения, энергия рекуперации, тепловой накопитель энергии, энергосбережение.

The data on the assessment of the volume of excess energy recovery in the traction power supply system of the Moscow metro and technical means for its utilization using various types of energy storage are presented. The design of a thermal energy storage device and a schematic diagram of its connection to the traction network are presented. The main design elements, control systems, features of the refrigerant and the principle of operation of the entire thermal energy storage system are described. The results of experimental studies of a stationary electric energy storage device for the utilization of excess energy recovery at an operating traction substation of the Moscow Metro are used. The oscillograms of the current and voltage of the storage device are presented in real time during the day, as well as the results of statistical processing of energy consumption. A method for estimating the average electrical power consumption of excess energy recovery, which is subsequently converted into thermal energy, is presented. Based on experimental data, an assessment was made of the possible heating area of the subway premises due to excess energy recovery during train braking.

**Key words:** traction network of the subway, traction power supply system, energy recovery, thermal energy storage, energy saving.

*Электротехника, 2024, №9, стр. 54-63*

### **Высокочастотное синфазное напряжение как причина повреждения подшипников тяговых электродвигателей**

ЛИТОВЧЕНКО В.В., ПУДОВИКОВ О.Е., НАЗАРОВ Д.В., РОТАНОВ В.Н., ШАРОВ В.А.

Анализ процессов в силовых электрических цепях тягового привода электропоезда постоянного тока с асинхронными двигателями показал, что наибольшие значения синфазного напряжения возникают при пуске асинхронного тягового двигателя электропоезда. В этом режиме подшипниковые токи и их частота могут достигать максимальных значений и быть причиной повреждения подшипников тяговых двигателей. Путем математического имитационного эксперимента определены факторы, вызывающие повреждения подшипников тяговых двигателей при воздействии синфазного напряжения. Показано, что применение моторно-якорных подшипников с защитным диэлектрическим покрытием является эффективным методом снижения повреждаемости подшипников благодаря емкостному сопротивлению и уменьшению тем самым подшипникового тока, однако основным средством снижения высокочастотных токов является надлежащая система заземления. Необходимо уменьшать активное сопротивление и индуктивность заземляющего провода путем заземления остова тягового двигателя на ось приводимой им в движение колесной пары. Кроме того, муфту, передающую вращающий момент от тягового двигателя к редуктору, рационально выполнять из электрически непроводящих материалов.

**Ключевые слова:** электропоезд постоянного тока, асинхронный тяговый двигатель, моторно-якорные подшипники, повреждение подшипников, высокочастотное синфазное напряжение, система заземления.

An analysis of the processes in the power electric circuits of the traction drive of a DC electric train with asynchronous motors has shown that the highest values of common-mode voltage occur when the asynchronous traction motor of an electric train is started. In this mode, the bearing currents and their frequency can reach maximum values and cause damage to the bearings of traction motors. By means of a mathematical simulation experiment, the factors

causing damage to the bearings of traction motors when exposed to common-mode voltage are determined. It is shown that the use of motor-armature bearings with a protective dielectric coating is an effective method of reducing bearing damage due to capacitive resistance and thereby reducing bearing current, however, the main means of reducing high-frequency currents is an appropriate grounding system. It is necessary to reduce the active resistance and inductance of the grounding wire by grounding the backbone of the traction motor on the axle of the wheelset driven by it. In addition, the coupling transmitting torque from the traction motor to the gearbox is rationally made of electrically non-conductive materials.

**Key words:** DC electric train, asynchronous traction motor, motor-anchor bearings, bearing damage, high-frequency common-mode voltage, grounding system.

*Электротехника, 2024, №9, стр. 64-70*

### **Защита линий продольного электроснабжения от электромагнитного влияния тяговой сети**

БАДЁР М.П. , ЕРМОЛЕНКО Д.В., КУЛИКОВ А.А.

Выполнено моделирование и исследование электромагнитного влияния тяговой сети на смежную продольную линию электроснабжения в режимах холостого хода, нагрузки, когда на перегоне имеется электроподвижной состав, и режиме короткого замыкания в тяговой сети. Моделирование электромагнитного влияния выполнено методом зеркальных изображений, для которого необходимо было решить уравнения Д'Аламбера в цилиндрических координатах. Анализ и синтез несимметрии напряжений и погонных электрических параметров в фазных проводах, появляющейся в результате электромагнитного воздействия тяговой сети, говорит о возможном превышении нормированных значений согласно ГОСТ-32144-2013, особенно в условиях, когда высоковольтная линия устанавливается на опорах контактной сети. Предложены методы снижения несимметрии электрических параметров воздушной линии продольного электроснабжения, возникающей из-за электромагнитного влияния тяговой сети. Наиболее эффективной является защита линий продольного электроснабжения от электромагнитного влияния тяговой сети на основе транспозиции проводов воздушной высоковольтной линии электроснабжения.

**Ключевые слова:** тяговая сеть, линии продольного электроснабжения, электромагнитное влияние, несимметрия напряжений, транспозиция проводов.

Modeling and investigation of the electromagnetic effect of the traction network on the adjacent longitudinal power supply line in idle mode, load when there is an electric rolling stock on the stage, and short circuit mode in the traction network are performed. The simulation of electromagnetic influence was performed by the method of mirror images, for which it was necessary to solve the D'Alembert equations in cylindrical coordinates. The analysis and synthesis of the asymmetry of voltages and linear electrical parameters in phase wires, resulting from the electromagnetic action of the traction network, indicates a possible excess of the normalized values according to GOST-32144-2013, especially in conditions when the high-voltage line is installed on the supports of the contact network. The methods of reducing the asymmetry of the electrical parameters of the overhead line of longitudinal power supply arising from the electromagnetic influence of the traction network are proposed. The most effective is the protection of longitudinal power supply lines from the electromagnetic influence of the traction network based on the transposition of wires of an overhead high-voltage power supply line.

**Key words:** traction network, longitudinal power supply lines, electromagnetic influence, voltage asymmetry, wire transposition.

*Электротехника, 2024, №9, стр. 71-75*

### **Перспективные источники питания для моторвагонного подвижного состава**

БОДРИКОВ Д.И., ИНЬКОВ Ю.М., ФАДЕЙКИН Т.Н.

Рассмотрен вариант модернизации эксплуатирующегося моторвагонного подвижного состава путем применения мультитопливных накопителей электроэнергии для автономного хода поезда на определённое расстояние, использования энергии рекуперации и уменьшения вредных выбросов в городской черте. При дефиците энергии или аварийной ситуации накопитель должен компенсировать его из внутренних энергетических резервов вагона.

**Ключевые слова:** моторвагонный подвижной состав, контактная сеть, накопитель электроэнергии, суперконденсатор.

The option of upgrading the operating motor car rolling stock by using multi-fuel electric power storage devices for autonomous train travel over a certain distance, using energy recovery and reducing harmful emissions in the urban area is considered. In case of a shortage of energy or an emergency, the storage device must compensate for it from the internal energy reserves of the

car.

**Key words:** motor car rolling stock, contact network, electric power storage, supercapacitors.

*Электротехника, 2024, №9, стр. 76-80*

### **Прогнозирование аномалий в работе тяговых электродвигателей**

СИДОРЕНКО В.Г., КУЛАГИН М.А.

Статья посвящена анализу, обобщению и развитию опыта решения задач предиктивной аналитики, которые существенно влияют на безопасность движения. Применение новых метрик качества оценки работы модели, использование «скрытых» признаков работы тягового электродвигателя для оценки его состояния, сочетание различных методов машинного обучения позволяют повысить качество работы моделей. Рассмотрены этапы работы модели: показан способ формирования признаков и множества исходных данных; выбрана метрика качества работы алгоритма и интервалов наблюдений; предложены различные способы построения алгоритма оценки состояния тяговых электродвигателей и проведено сравнение результатов их работы с реальными данными. Показаны возможности использования результатов работы автокодировщика, возможности расширения области применения ранее введенных метрик в рамках вновь введенных, важность использования в качестве исходных данных не только результатов электротехнических измерений, но и диагностических сообщений.

**Ключевые слова:** электровозы, тяговые электродвигатели, предиктивная аналитика, машинное обучение, автокодировщик.

The article is devoted to the analysis, generalization and development of experience in solving predictive analytics problems that significantly affect traffic safety. The use of new quality metrics for evaluating the operation of the model, the use of «hidden» signs of the traction motor to assess its condition, and a combination of various machine learning methods can improve the quality of the models. The stages of the model operation are considered: the method of forming features and a set of initial data is shown; the metric of the quality of the algorithm and observation intervals is selected; various methods of constructing an algorithm for evaluating the condition of traction motors are proposed and the results of their operation are compared with real data. The possibilities of using the results of the auto-encoder operation, the possibility of expanding the scope of previously introduced metrics within the framework of newly introduced ones, the importance of using not only the results of electrical measurements, but also diagnostic data as input data are shown.

**Key words:** electric locomotives, traction motors, predictive analytics, machine learning, auto encoder.

*Электротехника, 2024, №9, стр. 81-88*

### **Система автоматического управления скоростью пригородного электропоезда**

БАРАНОВ Л.А., ЛЕГКАЯ В.И., ПУДОВИКОВ О.Е.

Рассмотрена модель системы автоматического управления скоростью движения электропоезда с переменной структурой. Поезд моделируется как многомассовая система, измерительный тракт скорости моделируется с учетом усреднения, временной дискретизации и квантования по уровню. Предлагается фильтрация погрешности квантования по уровню фильтром нижних частот. Применён закон управления с переменной структурой: пропорциональный или пропорционально-интегральный с прогнозом рассогласования. Проведена оптимизация коэффициентов регулятора по выбранному обобщенному критерию. Используется формирование управляющих сигналов, позволяющее улучшить динамику системы. Анализируются результаты имитационных экспериментов, позволяющие оценить эффективность регулятора.

**Ключевые слова:** скоростной электропоезд, система автоматического управления, качество управления, параметрический синтез, показатели качества, прогноз рассогласования, фильтр Баттерворта.

A model of an automatic speed control system for an electric train with a variable structure is considered. The train is modeled as a multi-mass system, the speed measuring path is modeled taking into account averaging, time sampling and level quantization. It is proposed to filter the quantization error by a low-pass filter. The law of control with a variable structure is applied: proportional or proportional-integral with a mismatch forecast. The optimization of the regulator coefficients was carried out according to the selected generalized criterion. The formation of control signals is used to improve the dynamics of the system. The results of simulation experiments are analyzed to assess the effectiveness of the regulator.

**Key words:** high-speed electric train, automatic control system, control quality, parametric synthesis, quality indicators, misalignment forecast, Butterworth filter.

*Электротехника, 2024, №9, стр. 89-91*

**Авторы номера**