

УДК 621.355
Ш875

Рецензенты:

д-р техн. наук, доцент *С. В. Брованов*
д-р техн. наук, профессор *Д. Л. Калужский*
д-р техн. наук, профессор *В. Ю. Нейман*

Штанг А. А.

Ш875 Повышение эффективности электротранспортных систем с использованием накопителей энергии : монография / А. А. Штанг, В. В. Бирюков. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2023. – 259 с. – (Монографии НГТУ).

ISBN 978-5-7782-5056-7

Рассмотрен комплекс вопросов, связанных с экономией электрической энергии во всех элементах технологической цепочки городского электрического транспорта: от источника питания до подвижного состава.

Монография предназначена для специалистов в области электрического транспорта и студентов направления подготовки «Энергетика и электротехника» в качестве дополнительного источника при формировании целостного взгляда на состояние дел и перспективы развития энергосбережения на транспорте с электрическим приводом.

УДК 621.355

DOI 10.17212/978-5-7782-5056-7
ISBN 978-5-7782-5056-7

© Штанг А. А., Бирюков В. В., 2022, 2023
© Новосибирский государственный
технический университет, 2022, 2023

УДК 621.355
III875

Reviewers:

Associate Professor S. V. Brovanov, D. Sc. (Eng.)

Professor D. L. Kaluzhsky, D. Sc. (Eng.)

Professor V. Yu. Neiman, D. Sc. (Eng.)

Shtang A. A.

III875 Improving the efficiency of electric transport systems using energy storage units : monograph / A. A. Shtang, V. V. Biryukov. – Novosibirsk : NSTU Publisher, 2023. – 259 p. – (NSTU Monographs).

ISBN 978-5-7782-5056-7

The complex of issues related to the saving of electric energy in all elements of the technological chain of urban electric transport from the power source to the rolling stock is considered in the monograph.

The monograph is intended for specialists in the field of electric transport and students majoring in power and electrical engineering as an additional source to form a holistic view of the state of affairs and prospects for the development of energy saving in vehicles with an electric drive.

УДК 621.355

DOI 10.17212/978-5-7782-5056-7
ISBN 978-5-7782-5056-7

© Shtang A. A., Biryukov V. V., 2022, 2023
© Novosibirsk State Technical University, 2022, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Введение	9
Глава 1. Электрический транспорт как сложный электротехнический комплекс.....	13
1.1. Структура электроподвижного состава как объекта потребления электрической энергии	21
1.2. Электроподвижной состав как источник электрической энергии	26
1.3. Источник энергии как фактор коррекции схемного решения электрических цепей подвижного состава	33
1.4. Анализ методов определения расхода энергии на движение электротранспортного средства.....	37
1.4.1. Определение расхода электроэнергии на основе тяговых расчётов.....	43
1.4.2. Аналитический метод определения расходов электрической энергии	48
1.4.3. Эмпирические методы оценки расходов электрической энергии	50
1.4.4. Оценка методов расчёта расхода энергии поездами	52
1.5. Энергетический баланс и оценка энергии при электрическом торможении электроподвижного состава	54
Библиографический список к главе 1.....	71
Глава 2. Система электроснабжения как источник технологических потерь энергии	75
2.1. Структура системы тягового электроснабжения как объекта технологических потерь электроэнергии.....	76
2.2. Определение схемного решения силовых цепей преобразовательных агрегатов тяговых подстанций.....	77
2.2.1. Анализ существующих систем тягового электроснабжения	78
2.2.2. Анализ схем тяговых сетей по показателям технологического расхода электроэнергии	100
Библиографический список к главе 2.....	113

Глава 3. Накопители энергии на транспорте	115
3.1. Критерии использования накопительных устройств в электротранспортной системе ...	116
3.2. Электрохимические накопители энергии	118
3.3. Механические накопители энергии.....	122
3.3.1. Пневмо- и гидроаккумуляторы	123
3.3.2. Инерционные механические накопители энергии	124
3.3.3. Электромеханические накопители энергии.....	127
3.3.4. Электрические накопители энергии	128
3.3.4.1. Индуктивные накопители.....	128
3.3.4.2. Сверхпроводящие накопители	129
3.3.4.3. Ёмкостные накопители энергии.....	130
3.3.5. Теплоэлектрические и гибридные накопители энергии	132
3.3.5.1. Теплоэлектрические накопители энергии.....	132
3.3.5.2. Гибридные виды накопителей	133
3.3.6. Конденсаторы двойного электрического слоя и их использование на транспорте.....	134
Библиографический список к главе 3.....	144
Глава 4. Применение накопителей энергии на транспорте	149
4.1. Распределение и использование энергии электрического торможения.....	149
4.2. Рекуперативный режим с активным потребителем на участке контактной сети.....	151
4.3. Анализ методов определения величины избыточной энергии	154
4.3.1. Метод определения избыточной энергии рекуперации.....	154
4.3.2. Метод определения среднеквадратичных нагрузок агрегатов тяговых подстанций.....	158
4.3.3. Метод непрерывного исследования графика движения поездов.....	160
4.3.4. Метод непрерывного исследования графика движения поездов с учётом влияния случайных факторов.....	164
4.3.5. Оценка возможности проведения актов рекуперации на основе формулы полной вероятности	169
4.3.6. Определение вероятности рекупераций на основе принципа состояний	170
4.4. Варианты использования энергии электрических торможений	176
4.4.1. Передача избыточной энергии рекуперации через шины тяговой подстанции	176
4.4.2. Автоматический пост секционирования	177
4.4.3. Инвертирование энергии в первичную энергосистему	179

4.5. Применение накопителей энергии в системе тягового электроснабжения	180
4.5.1. Выбор места размещения накопительного элемента	181
4.5.2. Энергоёмкость накопительного элемента и вероятность двойных актов торможения	185
4.5.3. Характер изменения пропускной способности линии и энергопотребления при внедрении накопительного элемента	188
4.5.4. Комбинированная схема накопительного элемента с автоматическим постом секционирования	198
Библиографический список к главе 4	201
Глава 5. Экономия энергии на подвижном составе	205
5.1. Структурные схемы транспортных средств с комбинированной энергетической установкой	206
5.2. Определение мощности тягового двигателя транспортного средства	215
5.3. Расчёт параметров накопителей электрической энергии на транспорте	224
Библиографический список к главе 5	234
Заключение	235
Приложения	237
Приложение 1. Данные результатов эксперимента	237
Приложение 2. Визуальное представление диалоговых окон программного комплекса	248

CONTENTS

Preface	7
Introduction.....	9
Chapter 1. Electric transport as a complex electrical complex.....	13
1.1. The structure of the electric rolling stock as an object of electric energy consumption	21
1.2. Electric rolling stock as a source of electric energy	26
1.3. Energy source as a factor in correcting the circuit design of electric rolling stock circuits	33
1.4. Analysis of methods for determining the energy consumption for electric vehicle movement.....	37
1.4.1. Determination of electricity consumption based on traction calculations.....	43
1.4.2. An analytical method for determining the electric energy consumption.....	48
1.4.3. Empirical methods for estimating the electric energy consumption.....	50
1.4.4. Assessment of methods for calculating energy consumption by trains	52
1.5. Energy balance and energy assessment during electric braking of the electric rolling stock	54
References to Chapter 1	71
Chapter 2. Power supply system as a source of technological energy losses.....	75
2.1. The structure of the traction power supply system as an object of technological electricity losses	76
2.2. The definition of the circuit design of power circuits of converting units of traction substations.....	77
2.2.1. Analysis of the existing traction power supply systems.....	78
2.2.2. Analysis of traction network schemes in terms of technological power consumption	100
References to Chapter 2	113

Chapter 3. Energy storage units in transport	115
3.1. Criteria for the use of storage units in the electric transport system	116
3.2. Electrochemical energy storage units.....	118
3.3. Mechanical energy storage units	122
3.3.1. Pneumatic and hydraulic accumulators.....	123
3.3.2. Inertial mechanical energy storage units	124
3.3.3. Electromechanical energy storage units	127
3.3.4. Electrical energy storage units	128
3.3.4.1. Inductive energy storage units.....	128
3.3.4.2. Superconducting energy storage units.....	129
3.3.4.3. Capacitive energy storage units.....	130
3.3.5. Thermoelectric and hybrid energy storage units	132
3.3.5.1. Thermoelectric energy storage units	132
3.3.5.2. Hybrid energy storage units	133
3.3.6. Electric double layer capacitors and their uses in transport	134
References to Chapter 3	144
Chapter 4. The use of energy storage units in transport	149
4.1. Distribution and use of electric braking energy	149
4.2. Regenerative mode with an active consumer in the contact network section	151
4.3. Analysis of methods for determining the amount of excess energy	154
4.3.1. The method for determining excess energy recovery.....	154
4.3.2. The method for determining the root-mean-square loads of traction substation units	158
4.3.3. The method of continuous study of train schedules	160
4.3.4. The method of continuous study of train schedules taking into account the influence of random factors.....	164
4.3.5. Assessment of the possibility of carrying out recovery acts based on the full probability formula	169
4.3.6. Determination of the probability of recovery based on the principle of states	170
4.4. Options for using the energy of electric braking	176
4.4.1. Transfer of surplus recovery energy via busbars of the traction substation	176
4.4.2. An automatic sectioning post	177
4.4.3. Inverting energy into the primary energy system.....	179
4.5. The use of energy storage units in the traction power supply system	180
4.5.1. Selecting the location of the storage element	181

4.5.2. The energy intensity of the storage element and the probability of double acts of braking	185
4.5.3. The nature of the change in line capacity and energy consumption when introducing a storage element.....	188
4.5.4. A combined storage element scheme with an automatic sectioning post.....	198
References to Chapter 4	201
Chapter 5. Energy saving on the rolling stock.....	205
5.1. Structural diagrams of vehicles with a combined power plant.....	206
5.2. Determining the power of the vehicle traction engine	215
5.3. Calculation of the parameters of electric energy storage units in transport.....	224
References to Chapter 5	234
Conclusion	235
Appendices.....	237
Appendix 1. Experimental results data	237
Appendix 2. Visual representation of dialog windows of the software package.....	248