

Министерство образования и науки Российской Федерации  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

С.А. ЕВДОКИМОВ, Н.И. ЩУРОВ

# СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ МНОГОФАЗНЫХ ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Монография

НОВОСИБИРСК  
2010

УДК 621.314.27  
Е 155

Рецензенты:

*Б.Ф. Симонов*, руководитель НПЦ силовой электроники  
НПО «ЭЛСИБ» ОАО, д-р техн. наук, академик РАЕН;

*Г.С. Зиновьев*, д-р техн. наук, профессор  
кафедры «Промышленная электроника», НГТУ

**Евдокимов С.А.**

Е 155 Структурный синтез многофазных вентильных преобразователей : монография / С.А. Евдокимов, Н.И. Щуров. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – 423 с. (Серия «Монографии НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-1406-4

Теоретические исследования, представленные в монографии, посвящены разработке методов структурного синтеза и схемотехнического анализа вентильных преобразователей переменного тока в постоянный. Описаны процедуры нескольких методов синтеза вентильных схем и геометрические правила генерации схемных решений трансформаторных преобразователей числа фаз. Отражена история развития схемотехники выпрямителей и дана топологическая классификация вентильных преобразователей, учитывающая современный уровень топологических исследований. Основным объектом приложения для разработанной теории структурного синтеза выбран преобразовательный комплекс электрического транспорта.

Книга предназначена для инженерно-технических работников проектных и научных организаций, конструкторских бюро, специалистов промышленности, связанных с разработкой, изготовлением и эксплуатацией преобразовательной техники и систем электроснабжения постоянного тока. Она может быть рекомендована для преподавателей, студентов, магистрантов и аспирантов различных специальностей.

УДК 621.314.27

ISBN 978-5-7782-1406-4

© Евдокимов С.А., Щуров Н.И., 2010  
© Новосибирский государственный  
технический университет, 2010

Ministry of Science and Education of the Russian Federation

NOVOSIBIRSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

S.A. EVDOKIMOV, N.I. SHCHUROV

# STRUCTURAL SYNTHESIS OF MULTIPHASE VALVE CONVERTERS

Monograph

NOVOSIBIRSK  
2010

UDK 621.314.27

E 155

Reviewers:

*B.F. Simonov*, SPA “ELSIB”, plc, the power electronics research  
and production centre, head, D.Sc.(Eng.), academician  
of the Russian Academy of Natural Sciences

Prof. *G.S. Zinoviev*, D.Sc. (Eng.),  
Industrial Electronics department, NSTU

**Evdokimov S.A.**

E 155     Structural synthesis of multiphase valve converters : monograph /  
S.A. Evdokimov, N.I. Shchurov. – Novosibirsk : NSTU Publisher,  
2010. – 423 pp. (“NSTU Monographs” series)

ISBN 978-5-7782-1406-4

The theoretical research presented in the monograph is concerned with developing methods of structural synthesis and circuit analysis of ac/dc valve converters. Some methods of valve circuit synthesis and geometric rules of the phase transformer converter circuit design are described. The history of the rectifier circuitry development is presented and a topological classification of valve converters with due regard to the state-of-the-art topological research is given. An electric transport converter complex is chosen to illustrate an application of the proposed structural synthesis theory.

The book is intended for engineers working in R&D organizations and construction departments, specialists involved in developing, manufacturing and operating converter installations and d. c. power supply systems. It can also be recommended to university teachers as well as to undergraduate, graduate and postgraduate students in various fields of specialization.

**UDK 621.314.27**

**ISBN 978-5-7782-1406-4**

© Evdokimov S.A., Shchurov N.I., 2010

© Novosibirsk State Technical University, 2010

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений .....	7
Предисловие .....	8
Введение .....	13
<b>Глава 1. Системы электроснабжения и электроподвижной состав электрического транспорта</b> .....	19
§ 1.1. Классификационные признаки систем электроснабжения. Достоинства и недостатки систем .....	19
§ 1.2. Классификационные признаки электроподвижного состава .....	27
§ 1.3. Системы тягового электроснабжения на постоянном токе и перспективы их развития.....	30
§ 1.4. Общие сведения о выпрямителях и требования, предъявляемые к ним на электрическом транспорте .....	37
<b>Глава 2. Развитие схемотехники выпрямителей в ходе их исторического совершенствования</b> .....	47
§ 2.1. Развитие схем выпрямления как отражение совершенствования электронных приборов .....	47
§ 2.2. Топологии вентильных схем преобразователей.....	52
§ 2.3. Особенности топологии систем вторичных обмоток преобразовательных трансформаторов.....	53
§ 2.4. Известные способы формирования кривой выпрямленного напряжения и генерации схем преобразователей числа и сдвига фаз.....	64
§ 2.5. Проблемы структурного синтеза вентильных преобразователей переменного тока в постоянный .....	78
§ 2.6. Развитие общих принципов создания полупроводниковых преобразователей и основ синтеза схем выпрямления .....	80
<b>Глава 3. Совершенствование теории структурного синтеза вентильных схем выпрямителей и методов схемотехнического анализа</b> .....	95
§ 3.1. Общие положения .....	95
§ 3.2. Метод анализа и синтеза, основанный на топологии вращающихся векторных диаграмм .....	97
§ 3.3. Закономерности, лежащие в основе методов структурного синтеза выпрямителей .....	107
§ 3.4. Синтез вентильных схем по временным диаграммам (метод временных диаграмм).....	110
§ 3.5. Построение вентильных схем на основе индексов линейных напряжений.....	123
§ 3.6. Синтез выпрямителей ортогональных напряжений.....	129

<b>Глава 4. Развитие общих принципов синтеза трансформаторных преобразователей .....</b>	<b>143</b>
§ 4.1. Геометрический подход к построению систем напряжений вторичных обмоток .....	143
§ 4.2. Геометрический способ построения преобразователей числа и сдвига фаз .....	149
§ 4.3. Геометрический способ построения 12 <i>n</i> -фазных преобразователей .....	176
§ 4.4. Теоретические основы построения асимметричных преобразователей числа фаз .....	194
§ 4.5. Основы построения «квазисекторных» преобразователей числа фаз .....	209
<b>Глава 5. Топологические признаки как основа классификации выпрямителей .....</b>	<b>221</b>
§ 5.1. Топологические особенности выпрямителей в известных классификациях .....	221
§ 5.2. Собственная топология классификации .....	223
5.2.1. Особенности построения вторичных обмоток .....	231
5.2.2. Особенности построения вентильной части .....	234
§ 5.3. Секторный и квазисекторный виды .....	235
§ 5.4. Примеры топологий .....	239
<b>Глава 6. Структурный синтез многоуровневых выпрямителей .....</b>	<b>247</b>
§ 6.1. Многоуровневые выпрямители с использованием ортогональных векторов напряжений трехфазных систем .....	247
§ 6.2. Принцип ротации фазосдвинутых источников трехфазных систем напряжений и его применение .....	260
§ 6.3. Основы синтеза преобразователей с ротацией систем .....	284
<b>Глава 7. Конструктивная несимметрия и снижение ее влияния в преобразователях электрического транспорта .....</b>	<b>301</b>
§ 7.1. Оценка влияния конструктивной несимметрии .....	301
7.1.1. Выбор типовой мощности трансформатора с учетом конструктивной несимметрии .....	301
7.1.2. Геометрические методы исследования процессов коммутации и влияния конструктивной несимметрии .....	310
7.1.3. Применение векторных диаграмм с полярными графиками .....	313
7.1.4. Математические модели электромагнитных процессов в трехфазных двенадцатипульсных выпрямителях последовательного типа .....	324

§ 7.2. Лестничный выпрямитель со сниженным влиянием конструктивной несимметрии для тяговой подстанции .....	331
7.2.1. Синтез схемы и вывод расчетных соотношений .....	331
7.2.2. Выбор трансформатора для реконструкции.....	340
7.2.3. Выбор выпрямителя .....	341
<b>Глава 8. Защита выпрямителей от перенапряжений.....</b>	<b>347</b>
§ 8.1. Организация защиты от перенапряжений.....	347
8.1.1. Общие положения .....	347
8.1.2. Основные причины возникновения перенапряжений, их классификация и некоторые параметры.....	349
8.1.3. Схемные решения устройств защиты .....	352
8.1.4. Основные технические характеристики устройств защиты ....	357
§ 8.2. Расчет числа вентилях, последовательно соединенных в плечах выпрямителей .....	364
§ 8.3. Защита вентилях в кольцевых схемах выпрямления .....	373
<b>Глава 9. Перспективы кольцевых схем выпрямления .....</b>	<b>385</b>
§ 9.1. Актуальность переоснащения выпрямителей блоками БСЕ1 по кольцевой схеме .....	385
9.1.1. Тенденции построения современных схем выпрямления .....	385
9.1.2. Повышение эффективности выпрямителей при модернизации по кольцевой схеме с блоками БСЕ1 .....	386
9.1.3. Оценка надежности 12-пульсного выпрямителя при переходе к кольцевой вентиляхной схеме .....	391
§ 9.2. Производственный эксперимент с кольцевой схемой и оценка экономического эффекта .....	399
9.2.1. Цель и задачи эксперимента.....	399
9.2.2. Обоснованность проведения опытно-исследовательской работы при модернизации вентиляхных блоков объекта-аналога по кольцевой схеме выпрямления без замены диодов блоками БСЕ1 .....	400
9.2.3. Обоснованность проведения опытно-исследовательской работы при модернизации вентиляхных конструкций выпрямителей ВТПЕД-3,15к-3,3к-21-У1 или выпрямителей, оснащенных блоками БСЕ1, по кольцевой схеме выпрямления .....	402
9.2.4. Оценка экономической эффективности модернизации выпрямителей по кольцевой схеме.....	403
Заключение.....	406
Библиографический список .....	408

## CONTENTS

Abbreviations .....	7
Preface .....	8
Introduction.....	13
<b>Chapter 1. Power Supply Systems and Electric Motive Power Transport .....</b>	<b>19</b>
§ 1.1. Classification characteristics of power supply systems. Advantages and disadvantages of the systems .....	19
§ 1.2. Classification characteristics of electric motive power transport .....	27
§ 1.3. Direct current electric motive power systems and prospects of their development .....	30
§ 1.4. General information on rectifiers and their characteristics neces- sary for electric transport.....	37
<b>Chapter 2. The Development of the Rectifier Circuitry in the Course         of Its Historical Advance .....</b>	<b>47</b>
§ 2.1. The development of rectifier circuits as a reflection of the progress in the electronic device design .....	47
§ 2.2. The topology of valve converter circuits.....	52
§ 2.3. Peculiarities of the converter transformer secondary winding to- pology .....	53
§ 2.4. Conventional methods of generating a rectified voltage curve and designing circuits of phase and phase displacement converters .....	64
§ 2.5. Problems of the structural synthesis of ac-to-dc valve converters .....	78
§ 2.6. The development of general design principles of semiconductor converters and ac-to-dc converter circuit synthesis.....	80
<b>Chapter 3. The Enhancement of the Theory of the Structural Synthesis         of Valve Rectifier Circuits and Methods of Circuitry Analysis .....</b>	<b>95</b>
§ 3.1. General notions .....	95
§ 3.2. The analysis and synthesis method based on the topology of rotat- ing vector diagrams .....	97
§ 3.3. Laws of the ac-to-dc converter structural synthesis .....	107
§ 3.4. The valve circuit synthesis based on time diagrams (the time dia- gram method) .....	110
§ 3.5. The design of valve circuits based on line voltage indices.....	123
§ 3.6. The synthesis of orthogonal voltage rectifiers.....	129
<b>Chapter 4. The Development of General Transformer Converter Synthe-         sis Principles .....</b>	<b>143</b>
§ 4.1. A geometrical approach to the design of secondary winding vol- tage systems .....	143



§ 4.2. A geometrical method of the phase and phase displacement converter design.....	149
§ 4.3. A geometrical method of the $12n$ -phase converter design .....	176
§ 4.4. Theoretical foundations of the asymmetric phase converter design.....	194
§ 4.5. Basics of the quasi-sector phase converter design .....	209
<b>Chapter 5. Topological characteristics as a basis for a rectifier classification .....</b>	<b>221</b>
§ 5.1. Topological rectifier peculiarities in conventional classifications .....	221
§ 5.2. An intrinsic classification topology.....	223
5.2.1. Peculiarities of the secondary winding design.....	231
5.2.2. Peculiarities of the valve design .....	234
§ 5.3. Sector and quasi-sector ac-to-dc converters .....	235
§ 5.4. Examples of topologies .....	239
<b>Chapter 6. Structural Synthesis of Multilevel Rectifiers .....</b>	<b>247</b>
§ 6.1. Multilevel rectifiers based on the orthogonal voltage vectors of three-phase systems .....	247
§ 6.2. The rotation principle of phase-shifted sources of three-phase voltage systems and its application .....	260
§ 6.3. Foundations of rotary system converter synthesis.....	284
<b>Chapter 7. Constructive Asymmetry and Reduction of its Effect in Electric Transport Converters.....</b>	<b>301</b>
§ 7.1. An estimation of a constructive asymmetry effect .....	301
7.1.1. A choice of a standard transformer power given a constructive asymmetry .....	301
7.1.2. Geometrical research methods of the commutation process and a constructive asymmetry effect .....	310
7.1.3. The application of polar vector diagrams with polar curves.....	313
7.1.4. Mathematical models of electromagnetic processes in series three-phase twelve-pulse rectifiers .....	324
§ 7.2. The ladder rectifier with a reduced constructive asymmetry effect for a traction substation .....	331
7.2.1. A circuit synthesis and calculation of circuit parameters .....	331
7.2.2. A choice of a transformer for redesign .....	340
7.2.3. A choice of a rectifier .....	341
<b>Chapter 8. Overvoltage Protection of Rectifiers .....</b>	<b>347</b>
§ 8.1. Overvoltage protection organization .....	347
8.1.1. General concepts .....	347

8.1.2. Main causes of overvoltages, their classification and some parameters .....	349
8.1.3. Protection device circuitry.....	352
8.1.4. Major technical characteristics of protection devices.....	357
§ 8.2. The calculation of the valve number series-connected in the rectifier arms.....	364
§ 8.3. Valve protection in ring rectification circuits.....	373
<b>Chapter 9. Prospects of Ring Rectification Circuits .....</b>	<b>385</b>
§ 9.1. The urgency of re-equipment of rectifiers with BCE1 units based on the ring circuit .....	385
9.1.1. Trends in the state-of-the-art rectification circuit design.....	385
9.1.2. The enhancement of efficiency by re-equipping rectifiers with BCE1 units based on the ring circuit .....	386
9.1.3. Reliability evaluation of a twelve-pulse rectifier with the ring connection .....	391
§ 9.2. The production experiment with the ring circuit and the evaluation of its efficiency.....	399
9.2.1. The experiment goal and objective .....	300
9.2.2. Reasons for R&D work in re-equipping prototype valve units by using the ring rectification circuit without replacing diodes with BCE1 units .....	400
9.2.3. Reasons for R&D work in re-equipping valve units of the VTPED-3, 15k-3.3-21-Y1 rectifiers or rectifiers equipped with the BCE1 units based on the ring rectification circuit .....	402
9.2.4. The efficiency evaluation of rectifier re-equipment based on the ring rectification circuit .....	403
Conclusions.....	406
References.....	408