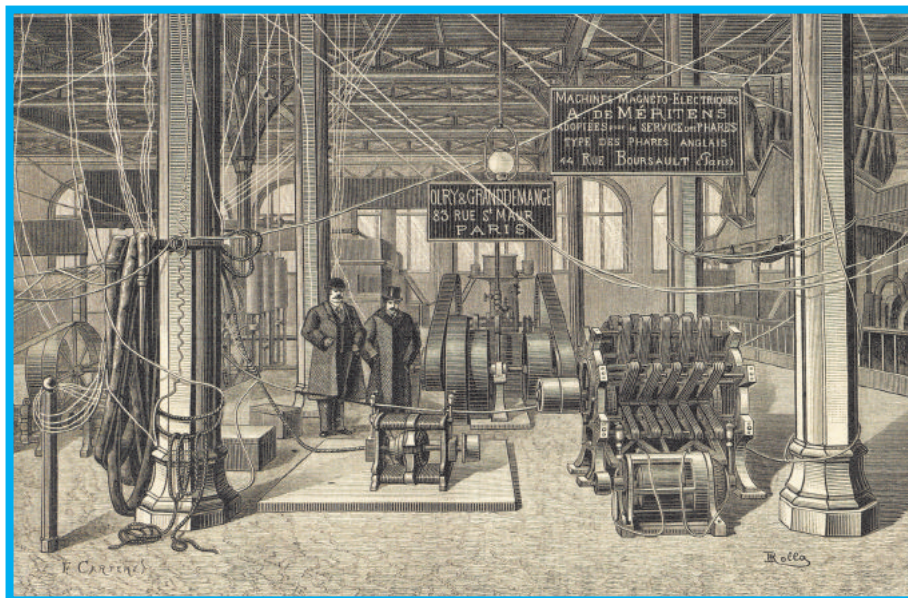


ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



2021

12

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Бутырин Павел Анфимович, главный редактор, член-корреспондент РАН, доктор техн. наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (Москва, Россия)

Анучин Алексей Сергеевич, доктор техн. наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (Москва, Россия)

Бааке Эгберт, профессор, Ганноверский Университет им. Лейбница (Ганновер, Германия)

Беспалов Виктор Яковлевич, доктор техн. наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (Москва, Россия)

Вольский Сергей Посифович, доктор техн. наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (Москва, Россия)

Воропай Николай Иванович, член-корреспондент РАН, доктор техн. наук, профессор, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН (Иркутск, Россия)

Высоцкий Виталий Сергеевич, доктор техн. наук, Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности (Москва, Россия)

Герара Кристофер, PhD, профессор, Ноттингемский Университет (Ноттингем, Англия)

Герасимов Андрей Сергеевич, кандидат техн. наук, Научно-технический центр единой энергетической системы (Санкт-Петербург, Россия)

Двин Бруно, PhD, профессор, Университет Лоррэйи (Нанси, Франция)

Демидович Виктор Болеславович, доктор техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (Санкт-Петербург, Россия)

Елистратов Виктор Васильевич, доктор техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия)

Ковалев Константин Львович, доктор техн. наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (Москва, Россия)

Коган Феликс Лазаревич, доктор техн. наук, ОАО «Фирма ОРГРЭС» (Москва, Россия)

Коровкин Николай Владимирович, доктор техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия)

Коротеев Анатолий Анатольевич, академик РАН, доктор техн. наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (Москва, Россия)

Корявин Алексей Родионович, доктор техн. наук, Всероссийский электротехнический институт (Москва, Россия)

Красовский Александр Борисович, доктор техн. наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (Москва, Россия)

Кучеров Юрий Николаевич, доктор техн. наук, АО «Системный оператор Единой энергетической системы» (Москва, Россия)

Лагарьков Андрей Николаевич, академик РАН, доктор техн. наук, Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН (Москва, Россия)

Лоскутов Алексей Борисович, доктор техн. наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (Нижний Новгород, Россия)

Мошкунов Сергей Игоревич, доктор техн. наук, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (Санкт-Петербург, Россия)

Новиков Николай Леонтьевич, доктор техн. наук, с.н.с., АО «Научно-технический центр Россети» (Москва, Россия)

Раков Владимир Александрович, PhD, профессор, Университет во Флориде (г. Гейнсвилл, Флорида, США)

Рашиди Фархад, PhD, профессор, Федеральный политехнический институт Лозанны (Лозанна, Швейцария)

Серебрянников Сергей Владимирович, доктор техн. наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (Москва, Россия)

Стров Владимир Андреевич, доктор техн. наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (Москва, Россия)

Хомич Владислав Юрьевич, академик РАН, доктор физ.-мат. наук, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (Санкт-Петербург, Россия)

Шевцов Даниил Андреевич, доктор техн. наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (Москва, Россия)

Шувалов Михаил Юрьевич, доктор техн. наук, Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности (Москва, Россия)

Ответственный секретарь **Е.Н. Соснина**, доктор техн. наук, профессор
Литературный редактор **Т.П. Александрова**
Младший редактор **Н.В. Чечунова**
Компьютерная верстка **М.С. Матвеева**
Перевод на английский язык **В.И. Филатов**

*Почтовый адрес редакции: 111250 Москва, Красноказарменная ул., 14,
НИУ «МЭИ», редакция журнала «Электричество»
Телефон, факс (495) 362-7485
E-mail: etr1880@mpei.ru
<http://etr1880.mpei.ru>*

*Полные тексты статей в формате pdf размещены на сайте Научной электронной библиотеки (НЭБ): www.elibrary.ru
Подписаться на журнал можно на официальном сайте каталога «Пресса России» www.pressa-ru.ru
и на сайте интернет-магазина «Пресса по подписке» www.akc.ru. Подписной индекс – 71106*

Подписано в печать 29.11.2021. Формат 60×84¹/₈. Тираж 150 экз.
Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Печ. л. 8,37. Заказ . Цена свободная.

Свидетельство о регистрации № 0110272 от 8 февраля 1993 г.
Министерства печати и информации Российской Федерации
Издатель: НИУ «МЭИ»
Отпечатано в типографии МЭИ

Theoretical and scientific-practical journal

ELEKTRICHESTVO

ESTABLISHED IN JULY 1880

№ 12, 2021

FOUNDERS

Russian Academy of Sciences
(the Division of Power Engineering, Mashinary Construction,
Mechanical and Control Processes)

The Editorial Board

- Butyrin Pavel A.**, Editor-in-Chief, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (Moscow, Russia)
- Anuchin Aleksey S.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (Moscow, Russia)
- Baake Egbert**, Professor, Leibniz University of Hannover (Hannover, Germany)
- Bespalov Viktor Ya.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (Moscow, Russia)
- Demidovich Viktor B.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Electrical Engineering University "LETI" (St. Petersburg, Russia)
- Douine Bruno**, PhD, Professor, University of Lorraine (Nancy, France)
- Elistratov Victor V.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University (St. Petersburg, Russia)
- Gerada Christopher**, PhD, Professor, University of Nottingham (Nottingham, U.K.)
- Gerasimov Andrey S.**, Cand. Sci. (Eng.), Scientific and Technical Center of the Unified Power System (St. Petersburg, Russia)
- Khomich Vladislav Yu.**, Full Member of the Russian Academy of Sciences, Institute for Electrophysics and Electric Power Engineering of the RAS (St. Petersburg, Russia)
- Kogan Feliks L.**, Dr. Sci. (Eng.), OJSC «Firm ORGRES» (Moscow, Russia)
- Koroteyev Anatoly A.**, Full Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Moscow, Russia)
- Korovkin Nikolay V.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University (St. Petersburg, Russia)
- Koryavin Aleksey R.**, Dr. Sci. (Eng.), All-Russian Electrotechnical Institute (Moscow, Russia)
- Kovalev Konstantin L.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Moscow, Russia)
- Krasovskii Aleksandr B.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Bauman Moscow State Technical University (National Research University) (Moscow, Russia)
- Kucherov Yury N.**, Dr. Sci. (Eng.), JSC "System Operator of the Unified Energy System" (Moscow, Russia)
- Lagar'kov Andrey N.**, Full Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of the RAS (Moscow, Russia)
- Loskutov Aleksey B.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (Nizhny Novgorod, Russia)
- Moshkunov Sergey I.**, Dr. Sci. (Eng.), Institute of Electrophysics and Electricity of the RAS (St. Petersburg, Russia)
- Novikov Nikolai L.**, Dr. Sci. (Eng.), Scientific and Technical Center of Rosseti (Moscow, Russia)
- Rachidi Farhad**, PhD, Professor, Federal Polytechnic Institute in Lausanne (Lausanne, Switzerland)
- Rakov Vladimir A.**, PhD, Professor, Florida University's Department for Electrical and Computer Engineering (Florida, USA)
- Serebryannikov Sergej V.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (Moscow, Russia)
- Shevtsov Daniil A.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Moscow, Russia)
- Shuvalov Michail Yu.**, Dr. Sci. (Eng.), All-Russian Research, Design and Technological Institute of the Cable Industry (Moscow, Russia)
- Stroev Vladimir A.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (Moscow, Russia)
- Volskiy Sergey I.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Moscow, Russia)
- Voropay Nikolay I.**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the RAS (Irkutsk, Russia)
- Vysotsky Vitaly S.**, Dr. Sci. (Eng.), All-Russian Research, Design and Technological Institute of the Cable Industry (Moscow, Russia)

Executive Secretary **E.N. Sosnina**, Dr. Sci. (Eng.), Professor
Literature Editor **T.P. Aleksandrova**
Junior Editor **N.V. Chechunova**
Computer-aided make-up **M.S. Matveeva**
Translator **V.I. Filatov**

*Editorial office address: NRU «Moscow Power Engineering Institute», Krasnokazarmennaya, 14,
Moscow, 111250 Russia
tel/fax (495) 362-7485
E-mail: etr1880@mpei.ru
<http://etr1880.mpei.ru>*

Full text articles in PDF format available on the website of the Scientific Electronic Library: www.elibrary.ru

*Publisher of the journal:
NRU «Moscow Power Engineering Institute»*

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛЬ: РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК (Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления)

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

Брянцев А.М., Поздняков С.В., Селезнёв Н.А. Магнитно-вентильные управляемые реакторы трансформаторного типа с пофазным регулированием мощности.....	4
Ahmed M.K., Osman M.H., Korovkin N.V. Optimal Location and Size of Multiple Renewable Distributed Generation Units in Power Systems Using an Improved Version of Particle Swarm Optimization..	15
Кизеветтер Д.В., Трубин Д.А., Кулкаев А.Е. Измерение пробивного напряжения вязких жидкостей.	28
Ибадуллаев М., Товбаев А.Н., Есенбеков А.Ж. К общей теории анализа субгармонических колебаний в трехфазных феррорезонансных цепях и системах	35

A.M. Bryantsev, S.V. Pozdniakov, N.A. Seleznev. Magnetic-Valve Controllable Transformer-Type Reactors with Phase-by-Phase Reactive Power Control	4
M.K. Ahmed, M.H. Osman, N.V. Korovkin. Optimal Location and Size of Multiple Renewable Distributed Generation Units in Power Systems Using an Improved Version of Particle Swarm Optimization.....	15
D.V. Kieseewetter, D.A. Trubin, A.E Kulkaev. Viscous Liquid Breakdown Voltage Measurements	28
M. Ibadullaev, A.N. Tovbaev, A.Zh. Esenbekov. On the General Theory for Analysis of Subharmonic Oscillations in Three-Phase Ferroresonance Circuits and Systems.....	35

ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

FROM THE HISTORY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Бородин Д.А. К 140-летию Международной электрической выставки 1881 года в Париже. Ч. 2. Самый понятный урок	45
Соколова М.В., Темников А.Г., Хренов С.И. 90 лет кафедре «Техника и электрофизика высоких напряжений» НИУ «МЭИ»	54

D.A. Borodin. On the 140 th Anniversary of the International Exhibition of Electricity, Paris, 1881. Part 2: The Most Understandable Lesson	45
M.V. Sokolova, A.G. Temnikov, S.I. Khrenov. The NRU MPEI Department of High Voltage Engineering and Electrophysics Turns 90	54

ХРОНИКА

CRONICLE

Феликс Лазаревич Коган (к 90-летию со дня рождения)	63
Валерий Александрович Альтов (к 80-летию со дня рождения).....	64
Указатель материалов , опубликованных в журнале «Электричество» в 2021 г.	65
Алфавитный указатель авторов статей.....	71
Рецензенты статей, опубликованных в 2021 г.....	72

Feliks Lazarevich Kogan (to the 90 th Anniversary of the Birth)	63
Valeriy Aleksandrovich Al'tov (to the 80 th Anniversary of the Birth)	64
Index of the Materials Published in the “Elektrichestvo” Journal in 2021	65
Alphabetical index of the authors	71
Reviewers of articles published in 2021.....	72

На обложке – Галерея машин на Международной электрической выставке в Париже, источник: Soulages C.-C. Exposition Internationale d'Electricité: Galerie des machines. - La lumière électrique, 1882, No. 25, 24 juin, pp. 587–590.

On the Cover is Gallery of Machines at the International Exhibition of Electricity in Paris, Source: Soulages C.-C. Exposition Internationale d'Electricité: Galerie des machines. - La lumière électrique, 1882, No. 25, 24 juin, pp. 587–590.

Магнитно-вентильные управляемые реакторы трансформаторного типа с пофазным регулированием мощности

БРЯНЦЕВ А.М., ПОЗДНЯКОВ С.В.

ЭСКО, Москва, Россия

СЕЛЕЗНЁВ Н.А.

Россети ФСК ЕЭС, Москва, Россия

Изложены основы теории, принцип действия, особенности электромагнитных процессов, схемотехнические и конструктивные решения принципиально нового трехфазного магнитно-вентильного реактора, управляемого магнитным полем, сочетающего повышенное быстродействие с высокоточной стабилизацией текущего значения мощности. Обоснована целесообразность моноблочного исполнения конструкции с размещением всех силовых элементов устройства в одном баке трансформаторного типа. Приведен пример исполнения магнитно-вентильного управляемого реактора трансформаторного типа мощностью 25 МВ·А напряжением 35 кВ и дан анализ эффективности его трехлетней эксплуатации в составе цифровой подстанции 220/110/35 кВ «Петровск-Забайкальская». Показано, что источник реактивной мощности на основе нового магнитно-вентильного управляемого реактора, кроме основной функции оптимизации потоков реактивной мощности между центрами питания и узлами нагрузок, позволяет нормализовать качество напряжения трёхфазной сети с нелинейной несимметричной нагрузкой по таким показателям, как компенсация медленных отклонений трёхфазного напряжения, симметрирование междуфазных напряжений и устранение несинусоидальности их формы.

Ключевые слова: магнитно-вентильные управляемые реакторы трансформаторного типа, пофазное регулирование, электромагнитная часть, индуктивный накопитель, алгоритм управления, моноблочная конструкция, качество электроэнергии, цифровая подстанция, нелинейная несимметричная нагрузка

Магнитно-вентильные управляемые реакторы трансформаторного типа с пофазным регулированием мощности представляют собой модифицированный вариант широко распространённых шунтирующих реакторов, управляемых магнитным полем [1–3]. Принципиальная электрическая схема фазы магнитно-вентильного управляемого реактора, поясняющая принцип действия устройства, показана на рис. 1.

Электромагнитная часть фазы ЭМЧ представлена в виде трехстержневой магнитной системы с двумя обмотками. Обмотки размещены на крайних стержнях магнитопровода, средний стержень выполнен с воздушным зазором. Вентильное устройство ВУ состоит из двух встречно-параллельно направленных полупроводниковых ветвей, включенных последовательно с обмотками электромагнитной части и переменного резистора r ; подключенного к точкам соединения ветвей ЭМЧ и ВУ. Выводы фазы подключаются к источнику напряжения U синусоидальной формы. Границам диапазона изменения тока фазы магнитно-вентильного реактора по схеме рис. 1 соответствуют два крайних значения сопротивления резистора r : «ноль», когда резистор замкнут; «бесконечность», когда ветвь резистора разомкнута.

Пример изменения графиков напряжения, тока и индукции магнитного поля в стержнях фазы при переключении резистора из положения «ноль» в положение «бесконечность» приведен на рис. 2.

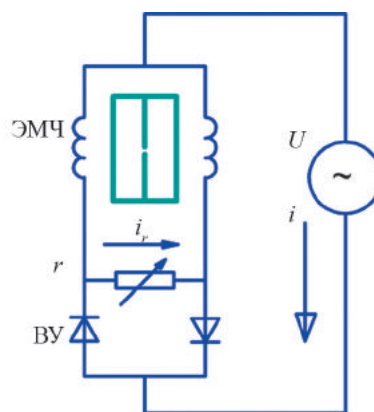


Рис. 1. Принципиальная схема магнитно-вентильного управляемого реактора: ЭМЧ – электромагнитная часть; ВУ – вентильное устройство; r – резистор с регулируемым сопротивлением

Fig. 1. Schematic diagram of a magnetically valve controlled reactor: ЭМЧ – electromagnetic part; ВУ – valve device; r – resistor with an adjustable resistance

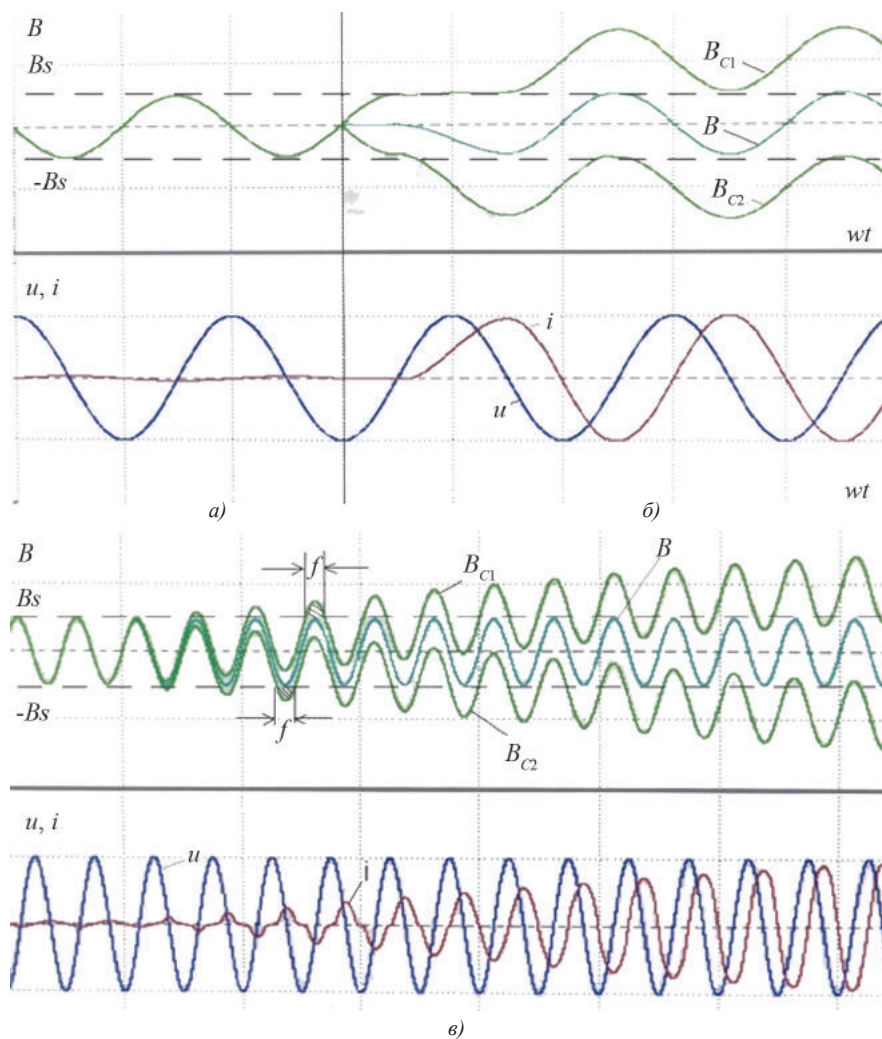


Рис. 2. Примеры изменения напряжения, тока и индукций магнитного потока фазы магнитно-вентильного управляемого реактора: u – мгновенное значение напряжения; i – мгновенное значение тока; B_s – индукция насыщения стержней; B_{c1}, B_{c2} – индукция магнитных потоков в крайних стержнях; B – индукция магнитного потока в воздушном зазоре среднего стержня; f – угол насыщения крайних стержней

Fig. 2. Examples of measuring the voltage, current and magnetic flux induction of the magnetically-valve controlled reactor phase: u – the instantaneous voltage value; i – the instantaneous current value; B_s – saturation induction of rods; B_{c1}, B_{c2} – magnetic flux induction in the outer rods; B – magnetic flux induction in the air gap of the middle rod; f – the saturation angle of the extreme rods

Когда сопротивление резистора r равно нулю, вентильное устройство не оказывает влияния на режим работы электромагнитной части, параметры которого подобраны так, что индукция магнитных потоков в крайнем и средних стержнях магнитной системы изменяется по синусоидальному закону и не превышает индукции насыщения стали стержней B_s . Ток фазы минимален, его значение и форма определяются в основном намагничивающей силой воздушного зазора среднего стержня (рис. 2,а). Режим работы фазы для этого случая определим как режим холостого хода (XX) с током I_{XX} и индуктивностью L_{XX} . При этом

$$I_{XX} = U/\omega L_{XX}, \tag{1}$$

где I_{XX} – действующее значение тока XX; U – действующее значение напряжения источника; ω – круговая частота сети; L_{XX} – индуктивность фазы в режиме XX.

При разрыве ветви r вентильное устройство насыщает магнитную систему электромагнитной части так, что в течение одного периода напряжения сети рабочая точка индукции в крайних стержнях полностью смещается в область насыщения кривой намагничивания (рис. 2,б). Как следствие, ток фазы возрастает до своего максимального значения.

Режим работы фазы для случая r , стремящегося к бесконечности, определим как режим предельного насыщения с максимальным током I_{max} и остаточной индуктивностью L_{min} . При этом

$$I_{max} = U/\omega L_{min}, \tag{2}$$

где I_{max} – максимальный ток фазы; L_{min} – остаточная индуктивность фазы или индуктивность фазы при предельном насыщении крайних стержней.

Следует отметить, что скорость перехода от минимального тока I_{XX} к максимальному I_{max} за время, не превышающее одного периода напряжения, в нормальных режимах работы магнитно-вентильного управляемого реактора избыточна. Например, рекомендуемое отраслевым стандартом ОАО «ФСК ЕЭС» [1] время изменения тока, управляемого магнитным полем шунтирующего реактора, от XX до номинального составляет 0,3–1,0 с. При необходимости время переходного процесса токов и магнитных потоков в фазе магнитно-вентильного реактора можно отрегулировать путём ограничения максимально возможного значения сопротивления резистора r . Пример переходного процесса длительностью около 0,3 с показан на рис. 2, в. В течение переходного процесса от минимального к максимальному току время нахождения крайних стержней магнитной системы в насыщенном состоянии в пределах одного периода также увеличивается. Количественной мерой времени нахождения крайних стержней в насыщенном состоянии является угол насыщения f [4]. Подбором значения сопротивления резистора r можно управлять не только скоростью переходного процесса, но также задавать любое значение промежуточного установившегося режима в границах диапазона регулирования тока фазы I_{ϕ} . При этом, по мере увеличения установившегося значения тока фазы действующий ток I_r резистора r монотонно снижается от своего максимального значения, равного I_{XX} , до значений, близких к нулю:

$$I_{\text{XX}} > I_r > 0. \quad (3)$$

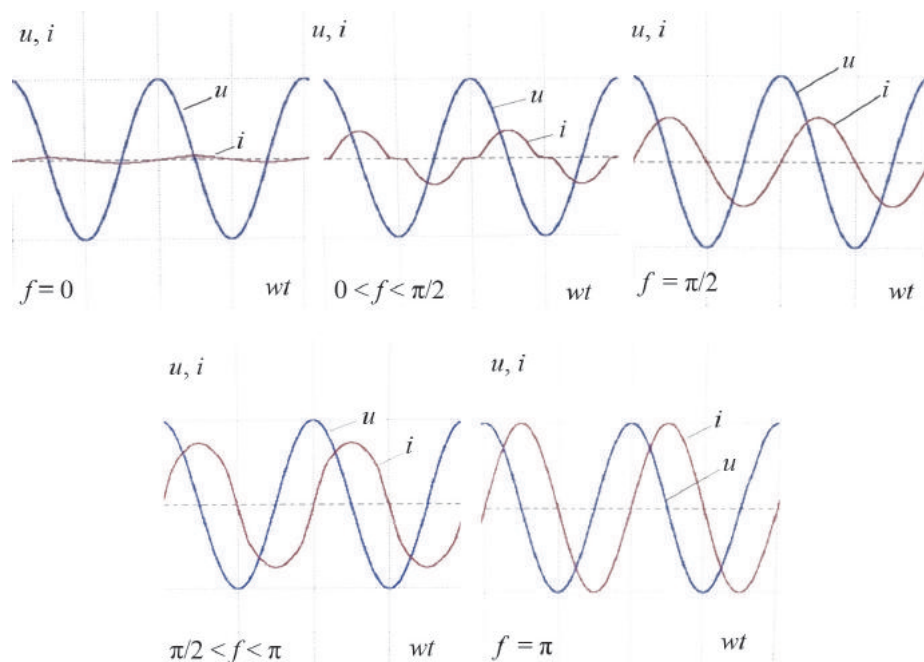


Рис. 3. Графики напряжения и тока фазы для характерных углов насыщения стержней f

Fig. 3. Graphs of voltage and phase current for characteristic angles of rod saturation f

Графики напряжения и тока фазы установившихся режимов для характерных углов насыщения f приведены на рис. 3.

Из приведённых выше пояснений, касающихся особенностей электромагнитных процессов, следует, что принцип действия магнитно-вентильного управляемого реактора основан на изменении постоянной составляющей магнитного поля его электромагнитной части. Таким образом, по характеру физических процессов магнитно-вентильный управляемый реактор может быть определен как регулируемый индуктивный накопитель энергии. Регулирование энергии магнитного поля и, как следствие, управление значением тока фазы достигаются изменением значения сопротивления резистора r .

Из графиков (рис. 2 и 3) видно, что изменение основной гармоники тока фазы I_{ϕ} сопровождается появлением в его форме полного спектра нечетных гармоник. Амплитуда гармонической составляющей тока фазы n -порядка $I_{(n)}$ зависит от значения угла насыщения f следующим образом [5]:

$$I_{(n)} = I_{\text{max}} \frac{1}{n\pi} \left[\frac{\sin(n-1)f}{n-1} - \frac{\sin(n+1)f}{n+1} \right], \quad (4)$$

где $n = 3, 5, 7, \dots$ – порядок гармонической составляющей.

Графики изменения амплитуд первых трёх гармоник тока фазы в функции угла насыщения f приведены на рис. 4.

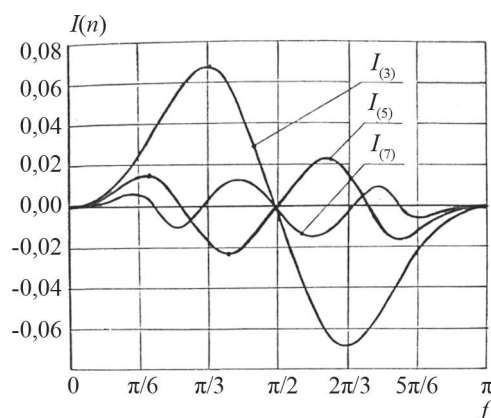


Рис. 4. Графики изменения амплитуд высших гармонических составляющих тока фазы

Fig. 4. Graphs of changes in the amplitude of the higher harmonic phase current

Абсолютные максимумы амплитуд гармоник выражения (4) определяются из условия нуля функции ее первой производной и равны

$$I_{\max(n)} = \frac{2}{(n^2 - 1)\pi} \sin \frac{(n-1)\pi}{2n}. \quad (5)$$

Численные значения максимумов первых шести гармоник тока фазы, приведённые к максимальному току основной гармоники, приведены в таблице.

<i>n</i>	3	5	7	9	11	13
<i>f</i>	$\pi/3$	$2\pi/5$	$3\pi/7$	$4\pi/9$	$5\pi/11$	$6\pi/13$
$I_{\max}(n)$	0,0689	0,0252	0,0129	0,0078	0,0052	0,0018

Принципиальная электрическая схема трехфазного магнитно-вентильного управляемого реактора приведена на рис. 5. В состав конструкции входят электромагнитная часть ЭМЧ, вентильное устройство ВУ, блок резисторов *r* с электронными ключами K_3 . Блок резисторов *r* подключён к вентильному устройству через согласующий трансформатор ТС.

Номинальная мощность электромагнитной части равна номинальной мощности самого управляемого реактора. Номинальная мощность вентильного устройства относительно невелика и как во всех реакторах, управляемых магнитным полем, имеет тот же порядок, что и значение номинальных потерь в ЭМЧ. В свою очередь, номинальная мощность блока резисторов и согласующего трансформатора меньше номинальной мощности вентильного устройства на коэффициент, равный отношению тока ХХ к номинальному току.

Таким образом, при выполнении требований [1], что относительные потери и ток ХХ в управляемых шнуровых реакторах не должны превышать 1%, относительная номинальная мощность вентильного устройства должна быть как минимум на два порядка, а блока резисторов на четыре порядка меньше номинальной мощности электромагнитной части. Учитывая, что масса и габариты электромагнитной части составляют основную часть устройства, оборудование схемы (рис. 5) целесообразно размещать в общем

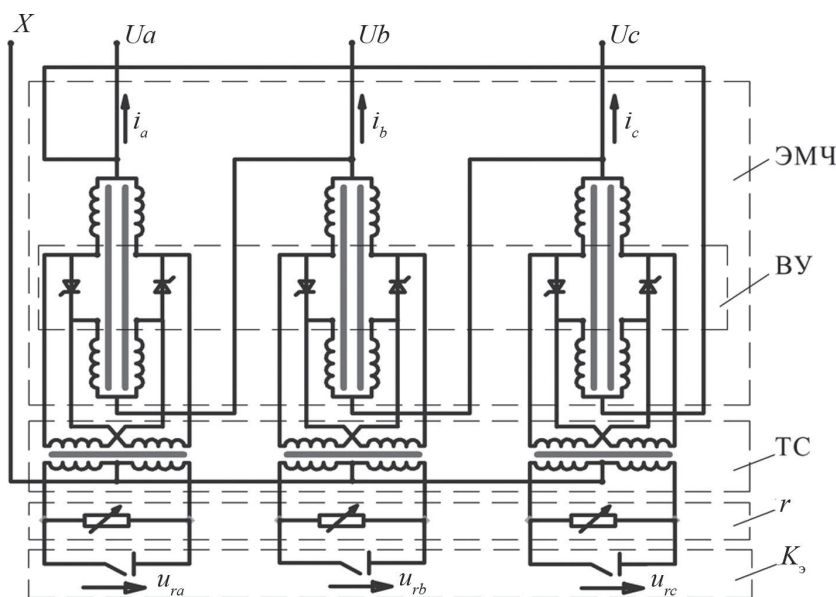


Рис. 5. Принципиальная схема трехфазного магнитно-вентильного управляемого реактора: ЭМЧ – электромагнитная часть; ВУ – вентильное устройство; *r* – резисторы; K_3 – электронные ключи; ТС – согласующие трансформаторы

Fig. 5. Schematic diagram of a three-phase magnetic-valve motor of the reactor: ЭМЧ – electromagnetic part; ВУ – valve device; *r* – resistors; K_3 – electronic keys; ТС – matching transformers

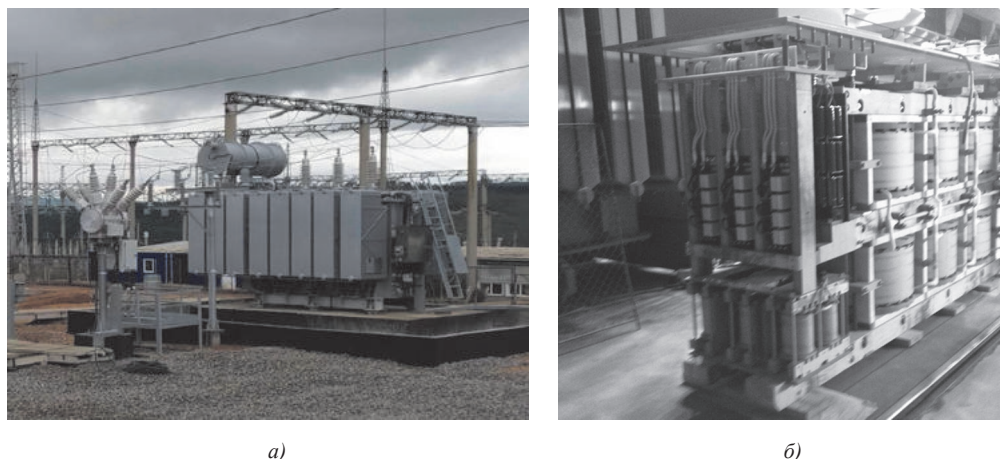


Рис. 6. УШРТм мощностью 25 МВ·А напряжением 35 кВ (полная масса 52 т, номинальные потери 200 кВт; габариты: длина 6460 мм, ширина 3565 мм, высота 4900 мм): *a* – общий вид; *b* – выемная часть

Fig. 6. UShRTm with the 25 MV·A capacity 35 kV (52 tons total weight; 200 kW nominal losses; dimensions: 6460 mm length, 3565 mm width, 4900 mm height): *a* – general view; *b* – removable part

маслонаполненном баке, аналогичном баку силовых трансформаторов [6].

Такая конструкция запатентована, и ее промышленное производство освоено десять лет назад [7]. Фотография общего вида и выемной части трехфазного магнитно-вентильного управляемого реактора мощностью 25 МВ·А напряжением 35 кВ трансформаторного типа (УШРТм) приведена на рис. 6.

По сравнению с известными типами управляемых реакторов УШРТм мощностью 25 МВ·А на класс напряжения 35 кВ имеет значительно меньшую массу, более низкие потери, сниженные габаритные размеры [8–10].

Управление мощностью УШРТм осуществляется электронными ключами K_3 . Потребление максимальной мощности имеет место в случае, когда электронные ключи K_3 находятся в постоянно разомкнутом состоянии (рис. 2, б). При постоянно замкнутых ключах K_3 устанавливается режим минимального потребления мощности (рис. 2, а). Любое из промежуточных значений мощности реактора (рис. 2, в) задается соотношением времени замкнутого или разомкнутого состояния ключей K_3 с длительностью каждого из состояний, равной или кратной периоду напряжения сети. Осциллограммы тока фазы и напряжения U_r на резисторах r в режиме автоматической стабилизации мощности приведены на рис. 7

Положение ключей K_3 изменяется при переходе знака сигнала рассогласования от плюса к минусу или наоборот. В течение времени замкнутого положения ключей K_3 происходит уменьшение энергии магнитного поля ЭМЧ со скоростью, пропорциональной значению потерь в обмотках, что приводит к уменьшению потребляемого тока фазы. При размыкании ключей K_3 напряжение U_r , возникающее на резисторах r (рис. 7), восстанавливает энергию магнитного поля ЭМЧ и, как следствие, значение потребляемого тока УШРТм.

С учетом того, что приращение или снижение энергии магнитного поля в течение одного периода напряжения сети, происходящее в процессе коммутации ключей K_3 , на несколько порядков ниже текущего значения энергии магнитного поля, запасенной в ЭМЧ, относительное отклонение тока фаз от заданного значения крайне незначительно и сопоставимо с классом точности измерительных устройств, входящих в контур обратной связи.

Таким образом, корректируя соотношения интервалов времени замкнутого и разомкнутого состояний ключей K_3 , можно плавно и с высокой точностью обеспечить регулирование токов фаз в пределах всего диапазона изменения мощности УШРТм. При этом, как видно из электрической схемы (рис. 5), существует

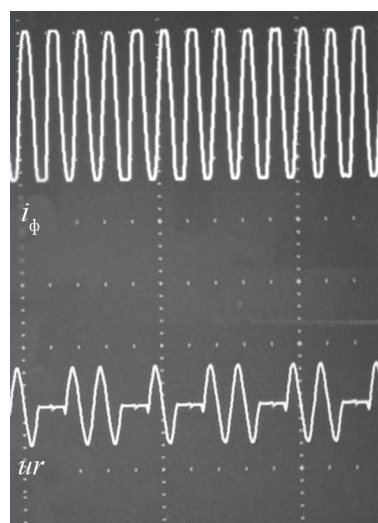


Рис. 7. Осциллограммы тока фазы электромагнитной части ЭМЧ и напряжения резистора r в установившемся режиме

Fig. 7. Oscillograms of the EMP electromagnetic part phase current and the resistor r voltage in steady state mode

принципиальная возможность выполнять регулирование каждого из токов фаз реактора по различным, не зависящим друг от друга, алгоритмам. Симметричный режим, когда электронные ключи K_j переключаются синхронно, является частным случаем закона регулирования мощностью УШРТм. Графики переходного процесса токов фаз в симметричном режиме показаны на рис. 8,а.

В симметричном режиме форма токов не содержит гармоник, кратных трем, а нечётные гармоники тока прямой и обратной последовательностей во всем ди-

апазоне регулирования незначительны и их значения (см. таблицу) не превышают требований [1], и следовательно, специальных мер по их подавлению не требуется.

При несинхронном независимом регулировании мощности фаз, когда электронные ключи K_j переключаются по индивидуальным законам, существует возможность достичь любой разности токов вплоть до номинального значения тока фазы (рис. 8,б и в). Принципиальная схема подключения статического компенсатора реактивной мощности к трёхфазной элек-

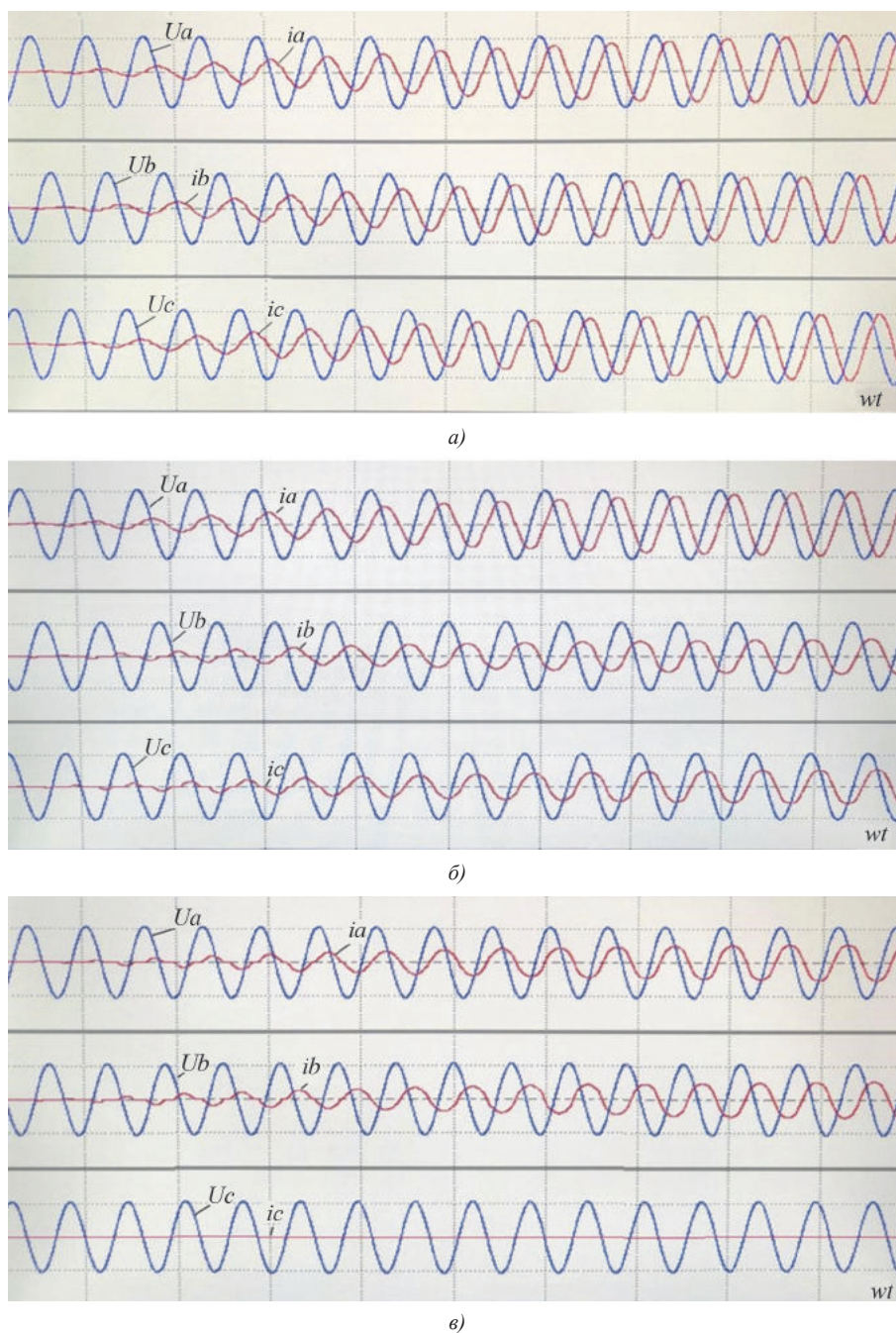


Рис. 8. Графики переходных процессов в УШРТм: а – симметричный трехфазный режим; б – двухфазный режим; в – однофазный режим

Fig. 8. An example of transient processes in CSRМ: а – symmetrical three-phase mode; б – two-phase mode; в – single-phase mode

трической сети, питающей двухфазную нелинейную нагрузку $S_{н}$, где применять несинхронное управление мощностью фаз управляемого реактора необходимо, приведена на рис. 9.

Статический компенсатор реактивной мощности, в дальнейшем модифицированный источник реактивной мощности ИРМм [11], кроме магнитно-вентильного управляемого реактора трансформаторного типа УШРТм содержит блок батарей конденсаторов БСКм, обладающих функцией фильтрации нечетных гармонических составляющих. Суммарная установленная мощность УШРТм и БСКм, входящая в источник реактивной мощности, определяется из теоремы Штейнмеца [12], согласно которой полное симметрирование мощности однофазной или двухфазной нагрузки обеспечивается при выполнении условия:

$$Q_{ИРМ} / S_{н} = \sqrt{3}, \quad (7)$$

где $Q_{ИРМ}$ – суммарная номинальная мощность УШРТм и БСКм; $S_{н}$ – номинальная мощность нелинейной нагрузки.

Фрагмент расчёта графиков напряжений и токов фаз трёхфазной сети ИРМм и нелинейной нагрузки $S_{н}$ для схемы рис. 9, полученный путём компьютерного моделирования электрических режимов на программном комплексе *NRAS*T, приведен на рис. 10.

При расчетах соотношение суммарной установленной мощности УШРТм и БСКм, входящих в ИРМм, принято с учетом (7). Мощность короткого замыкания

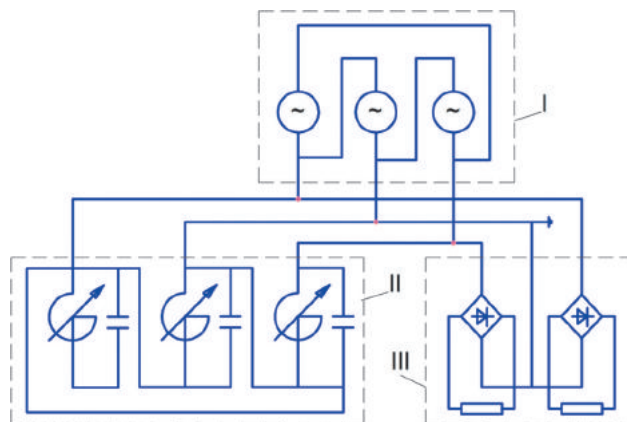


Рис. 9. Принципиальная схема подключения источника реактивной мощности к трехфазной сети, питающей двухфазную нелинейную нагрузку: I – трехфазная электрическая сеть; II – источник реактивной мощности; III – двухфазная нелинейная нагрузка

Fig. 9. Schematic diagram of connecting a reactive power source to a three-phase network supply-ing a two-phase non-linear load: I – three-phase electrical network; II – reactive power source; III – two-phase non-linear load

трехфазной сети и технические параметры нелинейной нагрузки аналогичны параметрам схем электроснабжения тяговых подстанций и нагрузок электрифицированной железной дороги [13, 14].

В левой части рис. 10 приведены результаты моделирования при подключённом ИРМм. В этом случае несимметрия и нелинейность нагрузки $S_{н}$ не оказывают влияния на симметрию и синусоидальность на-

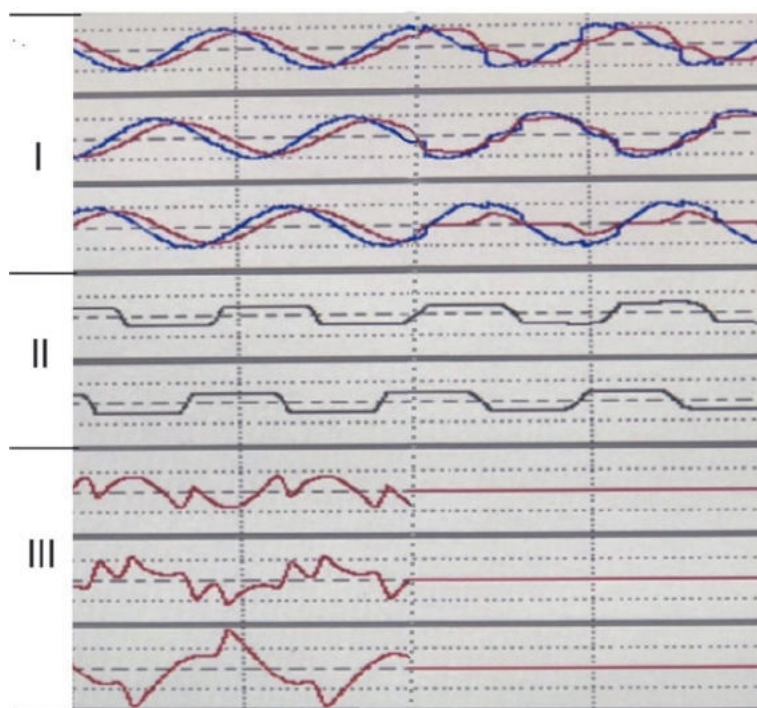


Рис. 10. Графики напряжений и токов трехфазной сети (I), токов двухфазной нелинейной нагрузки (II), токов фаз источника реактивной мощности (III) схемы рис. 9

Fig. 10. Diagrams of voltages and currents of a three-phase network (I), currents of a two-phase non-linear load (II), currents of phases of a reactive power source (III) of the Fig. 9 diagram

пряжений и токов трехфазной сети, их графики строго симметричны, а форма практически синусоидальна (поз. I рис. 10). Это обусловлено тем, что высшие гармоники тока и обратной последовательности нелинейной нагрузки S_n (поз. II рис. 10) и источника реактивной мощности ИРМм (поз. III рис. 10) находятся в противофазе и не имеют выхода в электрическую сеть. Следует подчеркнуть, что основной причиной резко выраженных искажений токов фаз ИРМм являются именно высшие гармоники тока нелинейной нагрузки S_n , поглощаемые батареями конденсаторов БСКм, по сравнению с которыми высшие гармоники, генерируемые УШРТм, незначительны (рис. 8). Если же ИРМм отключается, то, как видно из правой части графиков рис. 10, в питающей сети (поз. I рис. 10) из-за нелинейности нагрузки S_n (поз. II рис. 10) возникают нарушения симметрии и искажения формы напряжений, токов, типичные для электрической сети, питающей нелинейную несимметричную нагрузку, например подвижной состав электрифицированной железной дороги [13]. Таким образом, источник реактивной мощности ИРМм на базе УШРТм, кроме основной функции оптимизации потоков реактивной мощности между центрами питания и узлами нагрузок, позволяет также нормализовать качество напряжения трёхфазной сети с нелинейной несимметричной нагрузкой по таким показателям, как компенсация медленных изменений трехфазного напряжения, симметрирование междуфазных напряжений и устранение несинусоидальности их формы кривой [15].

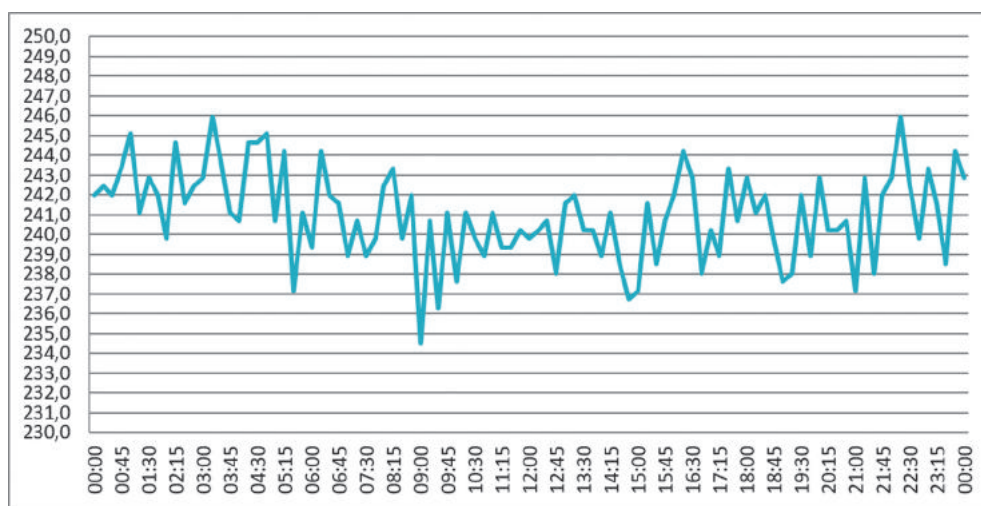
Одним из значимых результатов применения УШРТм является установка и ввод в эксплуатацию в 2018 г. двух образцов мощностью 25 МВ·А напряжением 38,5 кВ (тип РТУ– 25000/38,5) в рамках инновационного проекта расширения цифровой подстанции (ЦПС) 220 кВ «Петровск-Забайкальская». ЦПС 220 кВ

«Петровск-Забайкальская» является одним из опорных узлов электроснабжения Байкало-Амурской магистрали с преобладающей долей несимметричной нелинейной нагрузки. Управляемые реакторы РТУ– 25000/38,5 установлены для автоматической стабилизации напряжения шин 35 кВ.

Суточный график изменения напряжения шин ЦПС 220/110/35 кВ и графика мощности РТУ– 25000/38,5 приведен на рис. 11.

В течение суток максимумы отклонения текущего напряжения составили 5,5% на шинах 220 кВ и 2,5% на шинах 110 кВ. В то же время, в течение тех же суток отклонения напряжения на шинах 35 кВ не превысили 50 В, что составляет менее 0,15% номинального значения. Напряжение шин 35 кВ стабилизировано путём автоматического изменения мощности РТУ–25000/38,5 в диапазоне, составившим 30% его номинальной мощности. В результате ввод в эксплуатацию управляемых реакторов РТУ–25000/38,5 обеспечил высокоточную компенсацию отклонений напряжения на шинах 35 кВ независимо от имеющих место колебаний напряжения на шинах 110/220 кВ.

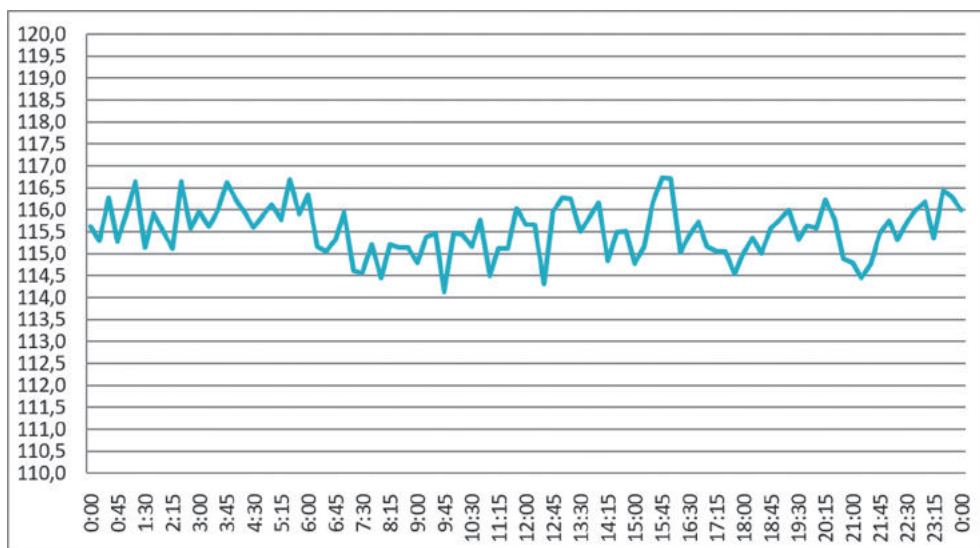
Исследования качества напряжения, регулярно проводимые специалистами электросетевого комплекса ПАО «Россети», показывают, что нарушения требований действующего стандарта «... имеют массовый и систематический характер во многих энергосистемах ...» [16, 17]. В первую очередь это касается показателей несимметрии и синусоидальности формы напряжения, особенно в электрической сети района Байкало-Амурской магистрали. Не менее актуальна данная проблема и для регионов опережающего развития Сибири и Дальнего Востока, имеющих значительные расстояния между центрами генерации электроэнергии и потребителями [18]. Магнитно-вентильные управляемые реакторы трансформаторного типа с пофазным регулиро-



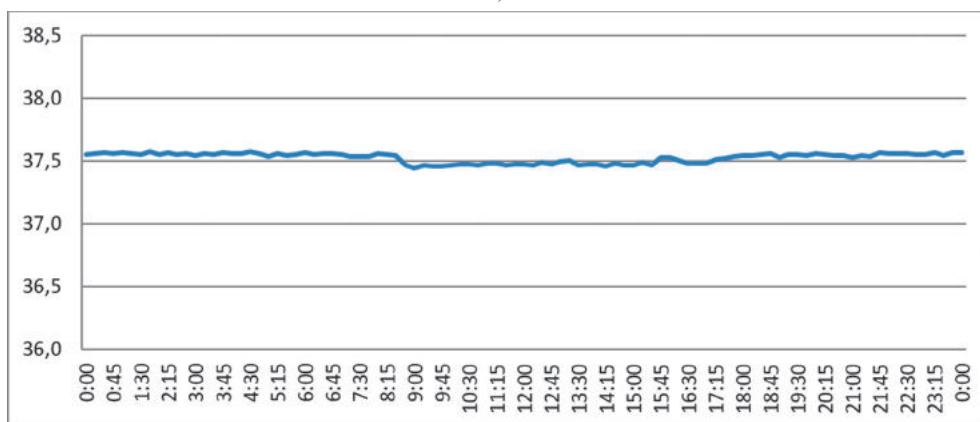
a)

Рис. 11. Пример суточных графиков ЦПС «Петровск-Забайкальская»: а – напряжения 220 кВ. Рис. 11, б, в, г представлен на стр. 12

Fig. 11. An example of the Petrovsk-Zabaikalskaya substation daily graphs of: a – the 220 kV voltage. Fig. 11, б, в, г is presented on page 12



б)



в)



г)

Рис. 11. Пример суточных графиков ЦПС «Петровск-Забайкальская»: б – напряжения 110 кВ; в – напряжения 35 кВ; г – мощности магнитно-вентильного управляемого реактора 25 МВ·Ар, 38,5 кВ

Fig. 11. An example of the Petrovsk-Zabaikalskaya substation daily graphs of: б – the 110 kV voltage; в – the 35 kV voltage; г – the 25 MV·Ar 38.5 kV magnetically controlled reactor power

ванием мощности и источников реактивной мощности на их основе могут рассматриваться в качестве технического средства полноценного решения обеспечения качества напряжения в проблемных регионах электросетевого комплекса ПАО «Россети».

Выводы. Магнитно-вентильные управляемые реакторы трансформаторного типа с пофазным регули-

рованием мощности, обладая повышенным быстродействием вплоть до одного периода напряжения сети, обеспечивают высокоточную (до долей процента) автоматическую стабилизацию и симметрию трехфазного напряжения в точке подключения.

Источники реактивной мощности на базе магнитно-вентильных управляемых реакторов с пофазным ре-

гулированием мощности обеспечивают нормализацию качества электроэнергии трёхфазной сети, питающей нелинейную несимметричную нагрузку по следующим показателям: медленные изменения трёхфазного напряжения; несимметрия междуфазных напряжений; несинусоидальность формы напряжения.

Многолетний опыт применения подтверждает надёжную и эффективную эксплуатацию магнитно-вентильных управляемых реакторов трансформаторного типа с пофазным регулированием мощности, в том числе и в составе современных цифровых подстанций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТО 56947007.29.180.03.198-2015. Управляемые шунтирующие реакторы для электрических сетей напряжением 110–500 кВ. Типовые технические требования. ОАО «ФСК ЕЭС», 2015, 45 с.
2. Smolovik S.V., Bryantsev A.M. Development of magnetically controlled shunt reactors in Russia. – Flexible AC Transmission Systems, pp. 401–421, DOI:10.1007/978-3-030-35386-5_28.
3. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. Теоретические и практические основы. Т. 2. Электрические подстанции переменного тока. Средства и интеллектуальные системы управления / Под ред. А.Ф. Дьякова. М.: НТФ «Энергопрогресс» Корпорации «ЕЭЭК», 2012, 668 с.
4. Бики М.А. и др. Электромагнитные процессы в мощных управляемых реакторах. – Электричество, 1994, № 6, с. 1–10.
5. Брянцев А.М. Подмагничиваемые ферромагнитные устройства с предельным насыщением магнитной цепи. – Электричество, 1986, № 2, с. 24–27.
6. Тихомиров П.М. Расчёт трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1986, 528 с.
7. Пат. RU 2 418 332 C1. Электрический трёхфазный реактор с подмагничиванием / А.М. Брянцев, 2011.
8. Матинян А.М. и др. Быстродействующие управляемые шунтирующие реакторы для ЕНЭС России и за рубежом. – Энергия единой сети, 2017, № 3(32), с. 38–44.
9. Makarevich L., et al. Controlled shunt reactor 500 kV 180 MVA with new design. Filed experience at NELUM substation. – A2-206 – 2014, SIGRE, 2014.
10. Долгополов А.Г. и др. Международный проект установки шунтирующего реактора на Игналинской АЭС. – Электрические станции, 2009, № 3, с. 13–21.
11. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д.Л. Файбисовича. М.: ЭНАС, 2012, 376 с.
12. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Трёхфазно-однофазные системы электроснабжения с преобразователями Штейнмеца. – Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2018, т. 59, № 3, с. 98–107.

13. Брянцев А.М., Брянцев М.А., Макарова М.А. Модифицированная серия управляемых шунтирующих реакторов и источников реактивной мощности. – Электроэнергия. Передача и распределение, 2018, № 4 (49), с. 94–100.

14. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Иванова Е.С. Анализ схем симметрирования на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока. – Системы. Методы. Технологии, 2013, № 4(20), с. 68–73.

15. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014, 16 с.

16. Коверникова Л., Тульский В., Шамонов Р. Качество электроэнергии в ЕЭС России. – Электроэнергия. Передача и распределение, 2016, № 2(35), с. 41–51.

17. Коверникова Л.И. Активные мощности гармоник в узлах присоединения нелинейных нагрузок к сети высокого напряжения. – Электричество, 2017, № 3, с. 12–20.

18. Экономика и управление в современной электроэнергетике России / Под ред. Е.В. Аметистова. М.: НП «КОНЦ ЕЭС», 2019, 726 с.

[11.10.2021]



Авторы: **Брянцев Александр Михайлович** – доктор техн. наук, председатель наблюдательного совета ООО «Электросетевые компенсаторы», Москва, Россия.



Поздняков Сергей Викторович – главный инженер ООО «Электросетевые компенсаторы», Москва, Россия.



Селезнёв Николай Алексеевич – сотрудник АО «Центр инжиниринга и управления строительством Единой энергетической системы» (АО «ЦИУС ЕЭС») ПАО «Россети ФСК ЕЭС», Москва, Россия.

Magnetic-Valve Controllable Transformer-Type Reactors with Phase-by-Phase Reactive Power Control

BRYANTSEV Alexander M. (LLC “Electric grid compensators”, Moscow, Russia) – Chairman of the Supervisory Board, Dr. Sci. (Eng.).

POZDNIAKOV Sergei V. (LLC “Electric grid compensators”, Moscow, Russia) – Chief Engineer.

SELEZNEV Nikolay A. (PJSC Rosseti FGC UES, Moscow, Russia) – Employee of JSC “Center for Engineering and Construction Management of the Unified Energy System” (JSC “CIUS UES”).

The article outlines the basic theory, operation principle, peculiarities of electromagnetic processes, and circuit and design solutions of a fundamentally new three-phase magnetic-valve controllable reactor, which combines increased response speed with high-precision stabilization of the current reactive power value. The advisability of a monoblock design with all power elements of the device placed in one transformer-type tank is substantiated. An example of the design of a magnetic-valve controllable transformer-type reactor for a capacity of 25 Mvar, and rated voltage of 35 kV is given along with an analysis of the effectiveness of its three-year operation as part of the Petrovsk-Zabaikalskaya 220/110/35 kV digital substation. It is shown that a reactive power source based on a new magnetic-valve controllable reactor is able---in addition to its main function of optimizing reactive power flows between power supply centers and load nodes---to normalize the voltage quality in a three-phase network with a nonlinear asymmetrical load in terms of such indicators as compensation of slow deviations of the three-phase voltage, symmetry of line-to-line voltages, and elimination of their waveform distortion.

Key words: magnetic-valve controllable transformer-type reactors, phase-by-phase power control, electromagnetic part, inductive energy storage, control algorithm, monoblock design, electric power quality, digital substation, nonlinear asymmetrical load

REFERENCES

1. **STO 56947007.29.180.03.198-2015.** *Upravlyayemye shuntiruyushchie reaktory dlya elektricheskikh setey napryazheniem 110–500 kV. Tipovye tekhnicheskie trebovaniya* (Controlled Shunt Reactors for Electric Networks with a Voltage of 110-500 kV. Typical Technical Requirements). OAO «FSK EES», 2015, 45 p.
2. **Smolovik S.V., Bryantsev A.M.** Development of magnetically controlled shunt reactors in Russia. – Flexible AC Transmission Systems, pp. 401–421, DOI:10.1007/978-3-030-35386-5_28.
3. **Elektricheskie seti sverh- i ul'travysokogo napryazheniya EES Rossii. Teoreticheskie i prakticheskie osnovy. T. 2. Elektricheskie podstantsii peremennogo toka. Sredstva i intellektual'nye sistemy upravleniya** (Electric Networks of Super- and Ultra-High Voltage of the UES of Russia. Theoretical and Practical Foundations. Vol. 2. Electrical Substations of Alternating Current. Tools and Intelligent Control Systems) / Under Ed. A.F. D'yakov. M.: NTF «Energoprogress» Korporatsii «EEEEK», 2012, 668 c.
4. **Biki M.A., et al.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1994, No. 6, pp. 1–10.
5. **Bryantsev A.M.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1986, No. 2, pp. 24–27.
6. **Tikhomirov P.M.** *Raschyot transformatorov* (Calculation of Transformers). M.: Energoatomizdat, 1986, 528 p.
7. **Pat. RU 2 418 332 C1.** *Elektricheskiy tryokhfaznyy reaktor s podmagnichivaniem* (Electric Three-Phase Reactor with Magnetization) / A.M. Bryantsev, 2011.
8. **Matinyan A.M., et al.** *Energiya edinoy seti – in Russ. (Unified Grid Energy)*, 2017, No. 3(32), pp. 38–44.
9. **Makarevich L., et al.** Controlled shunt reactor 500 kV 180 MVA with new design. Filed experience at NELUM substation. – A2-206 _ 2014, SIGRE, 2014.
10. **Dolgoplov A.G., et al.** *Elektricheskie stantsii – in Russ. (Electrical Power Plants)*, 2009, No. 3, pp. 13–21.
11. **Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setey** (Handbook on the Design of Electrical Networks) / Under Ed. D.L. Faybisovich. M.: ENAS, 2012, 376 p.
12. **Zakaryukin V.P., Kryukov A.V.** *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie – in Russ. (Modern Technologies. System Analysis. Modeling)*, 2018, vol. 59, No. 3, pp. 98–107.
13. **Bryantsev A.M., Bryantsev M.A., Makarova M.A.** *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie – in Russ. (Electricity. Transmission and distribution)*, 2018, No. 4 (49), pp.94–100.
14. **Zakaryukin V. P., Kryukov A.V., Ivanova E.S.** *Sistemy. Metody. Tekhnologii – in Russ. (Systems. Methods. Technologies)*, 2013, No. 4(20), pp. 68–73.
15. **GOST 32144-2013.** *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektroobzheniya obshchego naznacheniya* (Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Power Quality Limits in the Public Power Supply Systems). M.: Standartinform, 2014, 16 p.
16. **Kovernikova L., Tul'skiy V., Shamonov R.** *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie – in Russ. (Electricity. Transmission and distribution)*, 2016, No. 2(35), pp. 41–51.
17. **Kovernikova L.I.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 3, pp. 12–20.
18. **Ekonomika i upravlenie v sovremennoy elektroenergetike Rossii** (Economics and Management in the modern electric power industry of Russia) / Under Ed. E.V. Ametistov. M.: NP «KONTS EES», 2019, 726 p.

[11.10.2021]