

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 60, № 5
2017

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредители

Электроэнергетический совет СНГ,
Министерство образования Республики Беларусь,
Министерство образования и науки Российской Федерации

Журнал включен в базы данных:
EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ,
ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Фурсанов М. И. Схемно-конструктивные решения и информационное обеспечение городских электрических сетей в условиях SMART GRID.	393
Анищенко В. А., Писарук Т. В. Эффективность контроля достоверности измерений в автоматизированных системах управления энергосистемами по предельным значениям	407
Короткевич М. А., Подгайский С. И., Голомуздов А. В. Эффективность применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Часть 1	417
Сафарян В. С. Исследование режимов автономного синхронного генератора	433

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Кулаков Г. Т., Артёменко К. И. Системный анализ научно-технической информации по системам автоматического управления мощностью энергоблоков	446
Королев А. В., Ищенко А. П., Ищенко О. П. Исследование гидравлических ударов при заполнении системы компенсации давления в водоводяных энергетических реакторах	459
Осипов С. Н., Данилевский С. Л., Захаренко А. В. Использование воздушных прослоек в ограждениях зданий для энергосбережения при кондиционировании воздуха	470
Джалилов М. Ф., Азимова М. М., Джалилова А. М. О новой технологии подготовки горячей питьевой воды	484

Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

Редакционная коллегия

- С. Н. АСАМБАЕВ (Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Республика Казахстан),
В. ВУЙЦИК (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
В. В. ГАЛАКТИОНОВ (Русский институт управления имени В. П. Чернова, Москва, Российская Федерация),
М. ДАДО (Зволенский технический университет, Зволен, Словацкая Республика),
В. А. ДЖАНГИРОВ (Комитет ТПП РФ по энергетической стратегии и развитию ТЭК, Москва, Российская Федерация),
К. В. ДОБРЕГО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
И. В. ЖЕЖЕЛЕНКО (Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Украина),
П. В. ЖУКОВСКИЙ (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (первый заместитель главного редактора),
А. И. КИРИЛЛОВ (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация),
А. КОННОВ (Университет Лунда, Швеция),
Б. К. МАКСИМОВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),
Х. МАХКАМОВ (Университет Нортумбри, Великобритания),
А. А. МИХАЛЕВИЧ (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Е. С. МИШУК (Исполнительный комитет Энергетического совета Содружества Независимых Государств, Москва, Российская Федерация),
НГО ТУАН КИЕТ (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Е. Н. ПИСЬМЕННЫЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),
Э. Н. САБУРОВ (Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, Архангельск, Российская Федерация),
А.-С. С. САУХАТАС (Рижский технический университет, Рига, Латвийская Республика),
В. С. СЕВЕРЯНИН (Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь),
И. И. СЕРГЕЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
Б. С. СОРОКА (Институт газа НАН Украины, Киев, Украина),
В. А. СТРОЕВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ (ООО, Киев, Украина),
Е. В. ТОРОПОВ (Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация),
Е. УШПУРАС (Литовский энергетический институт, Каунас, Литовская Республика),
Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Л. В. ШЕНЕЦ (Евразийская экономическая комиссия, Москва, Российская Федерация)*

Ответственный секретарь редакции В. Н. Гурьянчик

Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 5 февраля 2010 г.
Регистрационный номер 1257

Набор и верстка выполнены в редакции журналов «Энергетика» и «Наука и техника»

Подписано к печати 26.09.2017. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,0. Уч.-изд. л. . Тираж 150 экз.
Дата выхода в свет . 2017. Заказ .

Адрес редакции: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65. Белорусский национальный технический университет, корп. 2, комн. 327. Телефон +375 17 292-65-14.
e-mail: energy@bntu.by; energy-bntu@mail.ru
<http://energy.bntu.by>

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© Белорусский национальный технический университет, 2017

ISSN 1029-7448 (Print)
ISSN 2414-0341 (Online)

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 60, No 5
2017

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founders

CIS Electric Power Council,
Ministry of Education of the Republic of Belarus,
Ministry of Education and Science of the Russian Federation

The Journal is included in the following databases:
EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, RISC,
Lan, CyberLeninka, Socionet

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Fursanov M. I. Circuit-Design Solutions and Information Support of City Electric Networks in the Conditions of the SMART GRID	393
Anishchenko V. A., Pissaruk T. V. The Effectiveness of Validation Measurements in Automated Systems of the Power Supply Systems Control in Accordance with Limit Values	407
Korotkevich M. A., Podgaitskiy S. I., Golomuzdov A. V. The Efficacy of the Cables of 6–110 kV with XLPE Insulation. Part 1	417
Safaryan V. S. The Study of the Autonomous Synchronous Generator Modes	433

HEAT POWER ENGINEERING

Kulakov G. T., Artsiomenka K. I. System Analysis of Scientific-and-Technical Information in Automatic Control System of Power Units Wattage	446
Korolyev A. V., Ishchenko A. P., Ishchenko O. P. Study of Water Hammers in the Filling of the System of Pressure Compensation in the Water-Cooled and Water-Moderated Power Reactors	459
Osipov S. N., Danilevskiy S. L., Zacharenko A. V. The Use of Air Layers in Building Envelopes for Energy Saving during Air Conditioning	470
Jalilov M. F., Azimova M. M., Jalilova A. M. On a New Technology of Preparation of Hot Drinking Water	484

Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

Editorial Board

- S. N. ASAMBAEV (Almaty University of Power Engineering & Telecommunications, Almaty, Republic of Kazakhstan),
W. T. WÓJCIK (Lublin University of Technology "Politechnika Lubelska", Lublin, Republic of Poland),
V. V. GALAKTIONOV (Russian Institute of Management named after V. P. Chernov, Moscow, Russian Federation),
M. DADO (Technical University in Zvolen, Zvolen, Slovak Republic),
V. A. JANGIROV (RF CCI Committee on Energy Strategy and the Development of Fuel-Energy Complex, Moscow, Russian Federation),
K. V. DOBREGO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
I. V. ZHEZHELENKO (Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine),
P. W. ZHUKOWSKI (Lublin University of Technology "Politechnika Lubelska", Lublin, Republic of Poland),
A. S. KALINICHENKO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (First Deputy Editor-in-Chief),
A. I. KIRILLOV (Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation),
A. KONNOV (Lund University, Sweden),
B. K. MAKSIMOV (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation),
K. MAHKAMOV (Northumbria University, United Kingdom),
A. A. MIKHALEVICH (The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
E. S. MISHUK (The Executive Committee of the Energy Council of the Commonwealth of Independent States, Moscow, Russian Federation),
NGO TUAN KIET (Research Energy Institute under the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),
O. G. PENYAZKOV (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
E. N. PISMENNYI (National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine),
E. N. SABUROV (Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation),
A.-S. S. SAUHATAS (Riga Technical University, Riga, Republic of Latvia),
V. S. SEVERYANIN (Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus),
I. I. SERGEY (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
B. S. SOROKA (The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine),
V. A. STROEV (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation),
V. I. TIMOSHPOLSKY (LLC, Kiev, Ukraine),
E. V. TOROPOV (South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation),
E. UŠPURAS (Lithuanian Energy Institute, Kaunas, Republic of Lithuania),
B. M. KHROUSTALEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
L. V. SHENETS (The Eurasian Economic Commission, Moscow, Russian Federation)

Executive Secretary of Editorial Board V. N. Guryanchyk

Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2010, February, 5th
Reg. No 1257

Typesetting and makeup are made in editorial office
of Journals "Energetika" and "Science and Technique"

Passed for printing 26.09.2017. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet .
An edition of 150 copies. Date of publishing 2017. Order list .

ADDRESS

Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave., Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-14
e-mail: energy@bntu.by; energy-bntu@mail.ru
<http://energy.bntu.by>

Printed in BNTU. License LP No 02330/74 from 03.03.2014.
220013, Minsk, 65 Nezavisimosty Ave.

© Belarusian National Technical University, 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-393-406

УДК 621.311:017

Схемно-конструктивные решения и информационное обеспечение городских электрических сетей в условиях SMART GRID

М. И. Фурсанов¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Проанализированы структура, схемно-конструктивные решения и информационное обеспечение городских электрических сетей в условиях SMART GRID (интеллектуальных электрических сетей). Показано, что новые условия функционирования электроэнергетики, повышение требований к ее технологическому состоянию и надежности в большинстве стран предопределили переход к реструктуризации электрических сетей на базе новой инновационной структуры SMART GRID. Приведены определения, различные атрибуты и признаки SMART GRID в наиболее развитых странах, в том числе и в Беларуси. Установлено, что существующие и перспективные схемные и конструктивные решения, позволяющие автоматизировать процесс управления режимами городских электрических сетей в условиях SMART GRID, весьма разнообразны. Наиболее распространенными в распределительных сетях в настоящее время являются источники распределенной генерации (турбины внутреннего сгорания, ветроустановки, фотоэлектрические установки, мини-ГЭС и т. д.). Проанализированы состояние схем и проблемы информационной наблюдаемости традиционных городских электрических сетей Объединенной энергетической системы Беларуси и показано, что в условиях SMART GRID большинство задач управления режимами, характерных для традиционных распределительных сетей 6–10 и 0,38 кВ, теряют свою актуальность. Поэтому в статье сформулированы и представлены основные направления развития автоматической системы управления режимами SMART GRID.

Ключевые слова: структура, городские электрические сети, SMART GRID, схема, конструкция, информация, режим, управление, направление развития

Для цитирования: Фурсанов, М. И. Схемно-конструктивные решения и информационное обеспечение городских электрических сетей в условиях SMART GRID / М. И. Фурсанов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 5. С. 393–406. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-393-406

Адрес для переписки

Фурсанов Михаил Иванович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-82
elsyst@tut.by

Address for correspondence

Fursanov Mikhail I.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-82
elsyst@tut.by

Circuit-Design Solutions and Information Support of City Electric Networks in the Conditions of the SMART GRID

M. I. Fursanov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The structure, circuit-design solutions and information support of the city electric networks in the conditions of the SMART GRID have been analyzed. It is demonstrated that the new conditions of functioning of electric power engineering, increasing demands for its technological state and reliability in most countries determined the transition to a restructuring of electrical networks to be based on the SMART GRID (intelligent power networks) innovative new structure. The definitions of the SMART GRID, its various attributes and characteristics in most developed countries including Belarus are presented. It is revealed that the existing and future circuit and constructive solutions that can automate the process of managing modes of urban electric networks under the SMART GRID conditions are manifold. At present, the most common in distribution networks are the sources of distributed generation (combustion turbines, wind turbines, photovoltaic installations, mini-hydro, etc.). The patterns and problems of information traceability of a traditional urban networks of the unified energy system of Belarus have been analyzed, and it is demonstrated that in the conditions of the SMART GRID most of the problems of the control mode that are characteristic for traditional distribution networks 6–10 kV and 0.38 kV, lose their relevance. Therefore, the present article presents and features the main directions of development of automatic control modes of the SMART GRID.

Keywords: structure, urban electric networks, the SMART GRID, circuit, design, information, mode, control, direction of the development

For citation: Fursanov M. I. (2017) Circuit-Design Solutions and Information Support of City Electric Networks in the Conditions of the SMART GRID. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (5), 393–406. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-393-406 (in Russian)

Введение

Городские электрические сети являются основным компонентом системы электроснабжения любого города, который осуществляет распределение электроэнергии по территории города с помощью городских (в основном кабельных) сетей 6–10 кВ и содержит трансформаторные подстанции (ТП) и линии, соединяющие центры питания (ЦП) с ТП и ТП между собой, а также распределительные сети до 1000 В, питающие потребителей электрической энергии [1]. При этом сети 35–110 кВ и выше называются электроснабжающими, а сборные шины 6–10 кВ питающих подстанций – центрами питания городских сетей.

В Республике Беларусь электроснабжение городов выполняют городские районы электрических сетей, а в Минске – Минские кабельные сети (МКС), в структуру которых входят 18 централизованных служб и отделов и шесть электросетевых районов. На балансе МКС 22 питающие подстанции 110/0,4 кВ, четыре подстанции 35/10/6 кВ и 1897 ТП. Общая протяженность воздушных и кабельных линий составляет 6345 км, включая 14000 участков распределительных сетей 6 (10) кВ.

Фрагмент городской электрической сети, приведенный на рис. 1, состоит из: двух питающих подстанций 35–110 кВ («Юго-Запад» и «Петровщина») с двумя сборными шинами 6–10 кВ (ЦП1 и ЦП2); трех распределительных линий (фидеры 302, 404 и 611); трех понижающих подстанций 10/0,38 кВ (ТП 2930, 2941 и 2725); сети 0,38 кВ, подключенной к абонентской ТП 2725, и двух источников распределенной генерации: Г1 – на шинах 10 кВ ТП 2930 и Г2 – на шинах 10 кВ ТП 2725.

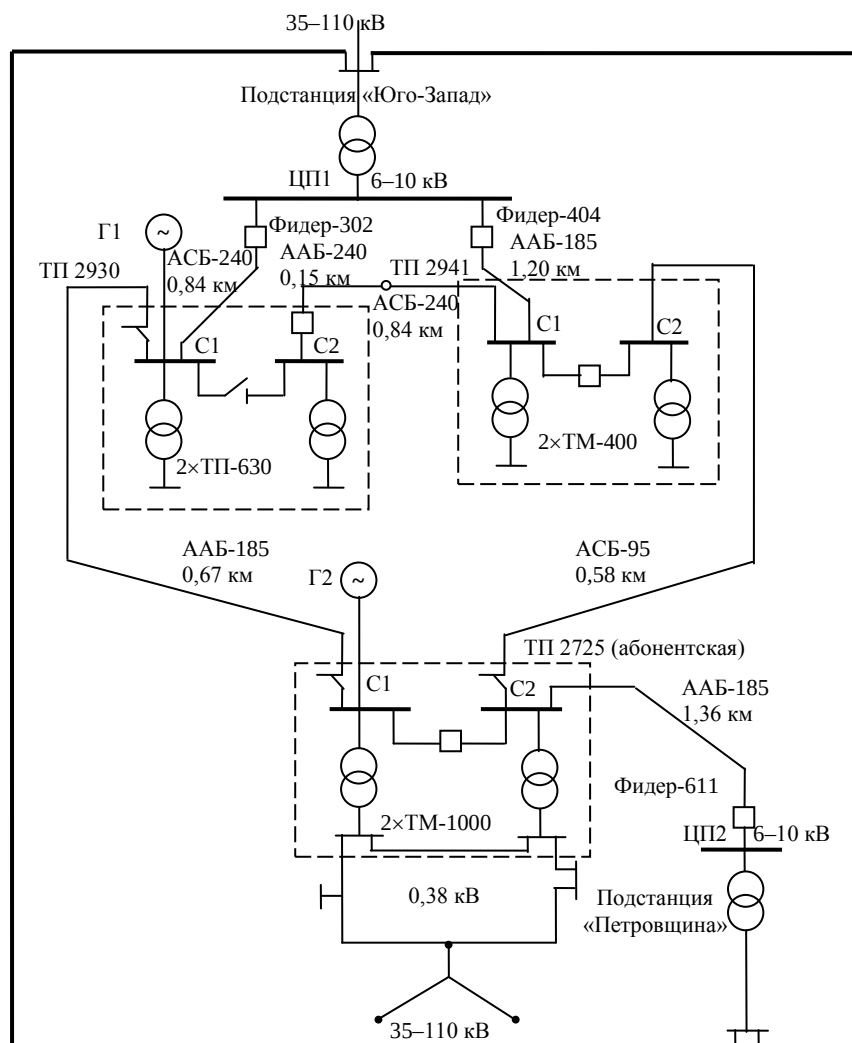


Рис. 1. Фрагмент городской электрической сети

Fig. 1. A fragment of city electric network

Для анализа и оптимизации режимов традиционных городских сетей 6–10 кВ на кафедре «Электрические системы» БНТУ разработан и в Беларуси повсеместно эксплуатируется универсальный промышленно-вычислительный комплекс GORSR [2]. Основными его функциями явля-

ются: создание модели электрической сети в реальном времени и решение основных технических задач эксплуатации городских сетей – расчет и анализ режима, оптимизация точек разреза, оценка чувствительности максимальных токовых защит, расчет и анализ емкостных токов замыкания на землю и зарядных токов и т. д. К приоритетным направлениям данного комплекса относятся: использование различных баз данных, разработанных на платформах СУБД, FoxPro, MS-Acces, Paradox, Oracle и других, а также графическое представление схем сетей и результатов расчета режима, в основу которого положено определение потокораспределения в кабельных линиях с двусторонним питанием, что в современных условиях реструктуризации городских электрических сетей не актуально и требует совершенствования.

Новые условия функционирования электроэнергетики, повышение требований к технологическому состоянию отрасли, надежности систем в большинстве развитых стран предопределили переход к реструктуризации электрических сетей энергосистем на базе инновационной организационной структуры SMART GRID (интеллектуальных электрических сетей). При этом реструктуризация подразумевает не только обновление основных производственных фондов, текущих и инвестиционных активов электрических сетей (проводников, трансформаторов, средств измерения и передачи информации, коммутационных аппаратов, паспортизации...), но и обеспечение энергетической (и экологической) безопасности и эффективности (энергетической и экономической) за счет нового типа сетей – «интеллектуальной» энергетики.

Термин SMART GRID (умные или интеллектуальные сети) официально используется с 2003 г. [3]. Однако единой трактовки этого понятия в мире до сих пор нет [3–5]. В мировой практике для определения структуры SMART GRID используются ее различные атрибуты и признаки (табл. 1).

В западных странах SMART GRID связывают, прежде всего, с интеграцией возобновляемых источников энергии с электроэнергетическими системами и формированием у электрических сетей активных и адаптивных свойств, таких как самодиагностика и самовосстановление. Также акцент делается на АСКУЭ, соединенные в единую информационную сеть и позволяющие оптимизировать расход энергии в разное время суток.

В России SMART GRID называется интеллектуальной электроэнергетической системой с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС) [5–7]. Под ней понимается комплекс электрооборудования (воздушные линии передачи, трансформаторы, выключатели и т. п.), подключенный к генерирующим источникам и потребителям на новых принципах, технологиях передачи и управления процессами. Предполагается объединение на новом технологическом уровне электрических сетей, потребителей и производителей электроэнергии в единую автоматизированную систему с активно-адаптивной сетью.

Таблица 1

Признаки SMART GRID в различных странах
Features of the SMART GRID in various countries

США	Европейский союз	Россия
Способность к самовосстановлению после сбоев в подаче электроэнергии	Гибкость – способность сети подстраиваться под требования потребителей электроэнергии	Насыщенность активными элементами, позволяющими изменять топологические параметры сети
Возможность активного участия в работе сети потребителей	Доступность для подключения новых пользователей, в том числе потребительских генерирующих источников	Насыщенность датчиками, измеряющими текущие режимные параметры сети
Устойчивость к физическому и кибернетическому вмешательству злоумышленников	Надежность – способность сети гарантировать защищенность и качество поставки электроэнергии в условиях массового применения цифровых технологий	Развитые системы сбора и обработки данных, а также управления активными элементами сети и электроустановками потребителей
Обеспечение требуемого качества передаваемой электроэнергии	Экономичность – максимальное применение инновационных технологий в построении, управлении и регулировании функционировании сети	Мониторинг и управление топологическим состоянием сети, а также взаимодействием со смежными энергетическими объектами в режиме реального времени
Обеспечение синхронной работы источников генерации и узлов хранения электроэнергии	Безопасность – недопущение ситуаций, опасных для людей и окружающей среды	Развитые системы автоматического анализа текущего состояния сети, построения прогнозов, поддержки принятия решений
Обеспечение появления новых высокотехнологичных продуктов и рынков		Высокое быстродействие систем информационного обмена, обработки, анализа и управления
Повышенная эффективность работы энергосистемы в целом		

ИЭС ААС России представляет собой электроэнергетическую систему нового поколения, основанную на мультиагентном принципе организации и управления ее функционированием и развитием с целью обеспечения эффективного использования всех ресурсов (природных, социально-производственных, человеческих) для надежного, качественного и эффективного электроснабжения потребителей за счет гибкого взаимодействия всех субъектов (всех видов генерации, электрических сетей и потребителей) на основе современных технологических средств и единой интеллектуальной иерархической системы управления. Важнейшая роль в ИЭС ААС отводится активно-адаптивной электрической сети как технологической инфраструктуре электроэнергетики, наделяющей интеллектуальную энергосистему принципиально новыми свойствами [6].

В Объединенной энергетической системе (ОЭС) Беларуси термин «SMART GRID» в распределительных электрических сетях определен СТП 09110.47.104–11 ГПО «Белэнерго» [8]. В соответствии с [8] SMART GRID представляет собой систему нового поколения, интегрирующую производителей, потребителей электроэнергии и электрические сети, образуя единое информационное и коммуникационное пространство. SMART GRID позволяет в реальном времени отслеживать и контролировать режимы работы всех участников процесса выработки, передачи и потребления электроэнергии, оперативно реагировать в автоматическом режиме на изменения параметров и осуществлять бесперебойное электроснабжение с максимальной экономической эффективностью при снижении влияния человеческого фактора. SMART GRID представляет собой совокупность линий электропередачи разных классов номинального напряжения, активных устройств электромагнитного преобразования электроэнергии, коммутационных аппаратов, устройств защиты и автоматики, информационно-технологических и адаптивных управляющих систем. При проектировании интеллектуальной части SMART GRID используются современные средства управления, новые системы диагностики и высокоскоростные системы передачи информации. В этом же документе SMART GRID определяется как главное направление перспективного развития распределительных электрических сетей Белорусской энергосистемы.

Схемно-конструктивные решения и информационное обеспечение городских электрических сетей в условиях SMART GRID

В настоящее время работы по построению концепции создания интеллектуальных сетей развиваются в основном в направлении их автоматизации. Это прежде всего относится к новым схемным и конструктивным решениям городских сетей (создание новой сетевой топологии с иерархической территориальной и технологической сегментацией и гибкими электросетевыми связями, обеспечивающими обмен и автоматическое регулирование и подключение мощностей; взаимодействие с любыми видами генерации, включая малые и альтернативные источники энергии, и т. д.), а также к построению единого информационного пространства, базирующегося на современных измерительных и коммуникационных технологиях. Существующие и перспективные схемные и конструктивные решения, позволяющие автоматизировать процесс управления режимами городских электрических сетей в условиях SMART GRID, весьма разнообразны. К схемным решениям можно отнести: широкое применение источников распределенной генерации (турбины внутреннего сгорания, фотоэлектрические установки, ветроустановки, мини-ГЭС и т. д.); сложность и объемность схем, имеющих большое количество резервных связей между распределительными пунктами 6–10 кВ, которые в нормальном режиме могут быть отключены; привязку схем перспективного развития сетей 0,4–10 кВ

к карте местности с учетом перспективного строительства или реконструкции, планируемые изменения в характере нагрузок и генерации; наличие требуемого уровня автоматизации с применением интеллектуальных устройств; содержание технических решений по увеличению пропускной способности, управляемости, надежности функционирования, эффективности и безопасной эксплуатации сетей.

Кроме того, схемы распределительных городских электрических сетей должны соответствовать определенным техническим решениям, мероприятиям и требованиям. Рекомендуемые технические решения: в сетях с преобладанием кабельных линий электропередачи рекомендуется применять двухлучевую (разных типоразмеров), а также петлевую схемы построения сети. Магистральный принцип предусматривает построение магистрали в сети напряжением 6–10 кВ от независимого источника питания (ПС 35–110/10 (6)) до точки соединения, через пункт АВР (как правило, РП или ОТП), с другой магистралью от другого независимого источника питания.

При наличии на магистралях ВЛ–10 кВ ответвлений (отпаяк) рекомендуется в целях секционирования, сетевого резервирования и в качестве отключающего аппарата применять реклоузеры (устройства с управляемым выключателем 10 кВ).

Для ответственных потребителей следует устанавливать устройство АВР-6-10 кВ в ТП и АВР-0,4 кВ, как правило, непосредственно во вводном устройстве потребителя.

На всех вновь вводимых ВЛ и КЛ напряжением 10 кВ необходимо предусматривать установку устройств регистрации аварийных режимов (индикаторов короткого замыкания) с подключением их к каналам телемеханики.

Новое строительство и реконструкцию городских сетей следует осуществлять на основе:

- выбора оптимального схемного решения построения сети города (района города) в зависимости от расположения источников питания;
- применения в кабельных сетях преимущественно кабелей 0,4–10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена и высоконадежной кабельной арматурой;
- применения (в условиях большой стесненности и при количестве кабелей (в пучке) более 20) блочных канализаций (как правило, с толстостенными полиэтиленовыми трубами) и (или) туннелей (в крупных городах);
- использования малогабаритных БКТПБ и РП в блочном исполнении с оборудованием 10 кВ на базе вакуумных (элегазовых) выключателей;
- применения на ВЛИ (в местах малоэтажной и частной застройки) многоцепных опор повышенной прочности с возможностью подвески СИП большого сечения (до 95–120 мм²);
- наличия генерирующих источников в распределительной сети.

К конструктивным можно отнести следующие решения: в трансформаторных подстанциях вместо масляных выключателей и выключателей нагрузок с механическими приводами необходима установка вакуумных выключателей нагрузок с поддержкой дистанционного управления по каналам связи устройств телемеханики.

Применение реклоузеров позволяет удаленно управлять электроснабжением потребителей и при необходимости автоматически отключать поврежденные участки сети, добиваться сокращения времени восстановления электроснабжения, снижения частоты повреждений линии и соответственно объема ремонтных работ.

Применение современного оборудования, конструкций, материалов и эффективных технологий (кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, отличающейся возможностью вертикальной прокладки и повышенной надежностью в эксплуатации; муфт из термоусаживаемого полиэтилена, обладающих более длительным сроком службы и высокими диэлектрическими свойствами, и т. д.).

Информационная система SMART GRID строится на оперативно-информационных комплексах (ОИК), включающих: устройства телеизмерения параметров режима электрической системы, сбора и агрегирования информации, каналы связи, базы данных, системы оперативного отображения параметров режима, программного обеспечения, обрабатывающего результаты телеизмерений и формирующего задания для объектов диспетчерского управления, электронные журналы – средства регистрации событий и диспетчерских команд.

Для того чтобы электрическая сеть превратилась в SMART GRID, недостаточно внедрения на ее объектах отдельных «умных» элементов. Требуется также адекватное информационное обеспечение, т. е. создание единого информационно-технологического пространства.

Известно [7], что в правовом поле SMART GRID опирается на пять семейств международных стандартов, два из которых посвящены общей информационной модели (CIM), необходимой для оперативного сбора и обмена данными между аппаратурой и сетями. Для этой цели целесообразно иметь современные базы данных городских электрических сетей и телемеханические средства сбора и передачи информации. В информационном поле важнейшим элементом SMART GRID в сетях любого уровня является цифровая подстанция.

Информация с цифровых подстанций SMART GRID концентрируется и передается на следующий уровень управления – в SMART-диспетчерские, потому что цифровые подстанции в присутствии постоянного обслуживающего персонала не нуждаются. Сопоставление традиционных и интеллектуальных электрических сетей показано в табл. 2, а краткая характеристика городских SMART GRID в Республике Беларусь проанализирована ниже.

Таблица 2

Сопоставление традиционной электрической сети и SMART GRID
Comparison of a traditional electric grid and the SMART GRID

Показатель сравнения	Традиционная сеть	SMART GRID
Сети потребителей		
Автоматизированная система управления энергопотреблением, в том числе с привлечением потребителей-регуляторов к участию в режимном управлении	Нет	Есть
Автоматизированная система учета электропотребления	Частично	Повсеместно
Система регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности	Частично	В необходимом объеме
Местные (резервные) источники генерации	Практически отсутствуют	Широкое применение малой генерации и накопителей электроэнергии
Наличие интерфейса связи с единым центром управления	Нет	Есть
Интеллектуальные энергосберегающие технологии в системах электроснабжения, в том числе такие, как «умный дом», «умный город»	Практически отсутствуют	Повсеместно
Распределительные сети общего назначения		
Системы автоматического контроля поузлового баланса активной и реактивной мощностей	Незначительно	Повсеместно
Системы контроля качества электроэнергии в узлах сети	Незначительно	Повсеместно
Системы централизованного автоматического управления нагрузкой потребителей	Нет	Есть
Наличие управляемых сетевых элементов, изменяющих параметры сети	Незначительно	Много
Наличие систем управления для поддержания баланса при выделении узлов сети на изолированную работу	Нет	Есть
Системы контроля и управления надежностью электроснабжения	Нет	Есть
Системообразующие сети объединенных энергосистем		
Системы автоматического контроля поузлового баланса активной и реактивной мощностей, потерь электроэнергии	Нет	Есть
Системы контроля напряжения в контрольных точках сети	Не развиты	Повсеместно
Система оперативной оценки текущего состояния (режимов) сети	Пассивная	Активная
Наличие сетевых элементов, изменяющих топологию сети по управляющим воздействиям	Нет	Есть

Окончание табл. 2

Показатель сравнения	Традиционная сеть	SMART GRID
Система автоматического контроля загрузки критических сечений и выдачи управляющих воздействий для их разгрузки	Есть	Дополнительно – автоматическое управление параметрами и конфигурацией сети
Система регулирования частоты и активной мощности в отделившихся энергорайонах при аварийных ситуациях	Не развита	Автоматическая
Система автоматизированной реконфигурации электрических сетей	Локальная	Есть
Система оперативного мониторинга переходных процессов и асинхронных режимов на базе синхронизированных векторных измерений	Локальная	Есть
Межсистемные сети		
Система оперативной оценки текущего состояния (режимов) сети	Пассивная	Активная
Система автоматического контроля загрузки электропередачи и выдачи управляющих воздействий для ее разгрузки (при перегрузках)	Есть	Дополнительно – автоматическое управление параметрами и конфигурацией сети

Анализ городских SMART GRID в Беларуси

Разработанные в республике методические рекомендации предусматривают несколько этапов внедрения технологии SMART GRID в распределительных электрических сетях ОЭС Беларуси:

- автоматизацию передачи и распределения энергии;
- установку «умных счетчиков» и обеспечение связи с ними;
- управление энергоснабжением жилых домов и коммерческих предприятий;
- формирование мощных центров обработки информации, поступающей от датчиков SMART GRID.

С учетом изложенного в стандарте предусматриваются практические меры для реализации первых шагов перехода распределительных сетей к SMART GRID.

Городские распределительные электрические сети ОЭС Беларуси характеризуются значительной долей кабельных линий (более 90 %). В традиционном исполнении эти сети обладают острой проблемой информационной наблюдаемости. Среди доступной режимной информации имеются только показания индукционных счетчиков активной и реактивной электроэнергии на головных участках распределительных линий за месяц, а также месячные данные цифровых приборов учета электроэнергии, установленных на вводах 6–10 кВ трансформаторов (35–110)/(6–10) кВ питающих подстанций (ПС) 35 кВ и выше, включая получасовые графики изменения электроэнергии. Данные об электропотреблении в трансформаторных подстанциях (6–10)/0,4 кВ, как и в других точках сети между

головным участком распределительной линии и ТП, практически отсутствуют. Причина – повсеместное использование индукционных счетчиков на нижнем уровне электрических сетей с отсутствием систем автоматического сбора и передачи данных. В электрических сетях 0,38 кВ единственной доступной информацией о нагрузках являются данные об электропотреблении абонентов из базы энергосбыта, которые зашумлены сезонной составляющей и другими (намеренными и ненамеренными) искажениями. Кроме того, схемы городских распределительных сетей состоят из пассивных элементов, не зависящих от режима сети и не изменяющихся от внешних управляющих воздействий. Понятно, что в условиях информационного голода, пассивности элементов, разомкнутости топологии и скромных возможностей регулирования основным направлением развития методов расчета городских распределительных сетей были восстановление, очистка и моделирование недостающей режимной информации, после чего решение большинства задач управления режимами становилось тривиальным, так как имела возможность использовать примитивные математические модели. Отсутствие необходимой режимной информации в городских сетях традиционного исполнения подталкивает разработчиков к объединению математических моделей сетей 6–10 и 0,38 кВ для их совместного расчета с целью повышения эффективности использования доступной режимной информации. Как показала практика, совместные математические модели сетей 0,38–10 кВ развернуть в оперативной памяти обычной ПЭВМ достаточно проблематично. Выходом является построение расчетов на методах декомпозиции, используя разомкнутую топологию городских электрических сетей 0,38–10 кВ.

В последние годы городские распределительные электрические сети ОЭС Беларуси активно насыщаются распределенными потребительскими генерирующими источниками, в том числе работающими на альтернативных источниках энергии [9]. Источники распределенной генерации подключаются к шинам ТП, в том числе на стороне нагрузки, и оснащаются автоматикой для обеспечения синхронной работы с энергосистемой, отключения от энергосистемы и поддержания автономной работы. Поэтому учет распределенной малой генерации в задачах управления режимами городских электрических сетей становится необходимым.

Большинство же задач управления режимами, характерных для традиционных городских распределительных сетей, в условиях SMART GRID теряют свою актуальность. Это обусловлено тем, что в отличие от городских распределительных сетей традиционного исполнения SMART GRID обладает исключительной наблюдаемостью. С другой стороны, математическая модель SMART GRID становится более сложной благодаря насыщению активно-адаптивными элементами и средствами регулирования.

Создание инфраструктуры технологического управления режимами и эксплуатацией оборудования SMART GRID должно предусматривать разработку интегрированной информационно-управляющей системы нового поколения, работающей в рамках единой информационной модели на

основе стандартизованных протоколов и интерфейсов взаимодействия и осуществляющей глобальный мониторинг и контроль функционирования всех секторов электроэнергетической системы, обеспечивая требуемое качество и надежность на всех уровнях.

Совместные расчеты городских сетей 6–10 и 0,38 кВ в условиях SMART GRID становятся не актуальными. По каждому ТП 6–10 кВ и каждому потребителю сетей 0,38 кВ в SMART GRID доступны графики изменения действующих значений параметров режима прямой, обратной и нулевой последовательностей на частотах каждой выявленной гармоники, а также графики изменения параметров активно-адаптивных элементов схемы сети.

Традиционно рассчитываемые режимные параметры в SMART GRID являются наблюдаемыми. Основные направления и расширения развития области применения автоматического управления режимами SMART GRID с уменьшением доли человеческого субъективизма и интеллектуализации этого управления достаточно подробно изложены в литературных источниках, например в [6].

При этом к одной из радикально новых концепций SMART GRID относятся микросети, которые в общем виде определяются как сети низкого напряжения с источниками распределенной генерации, накопителями энергии и контролируемой нагрузкой (например, обогревателями и кондиционерами). Важное свойство микросетей – то, что, несмотря на функционирование в рамках распределительной системы, они могут автоматически переводиться в изолированное состояние в случае аварий в сети и восстанавливать синхронизацию с сетью после устранения аварии с поддержанием требуемого качества электрической энергии. В будущем предполагается, что функционирование энергосистемы будет осуществляться путем тесного взаимодействия между централизованными и распределенными децентрализованными генерирующими мощностями [6].

Управление распределенными генераторами может быть собрано в единое целое, образуя микросети (microgrid) или «виртуальные» электростанции, интегрированные как в сеть, так и в рынок электроэнергии и мощности, что будет способствовать повышению роли потребителя в управлении электрическими системами. Микросети могут являться частью национальной энергетической системы: они связаны с региональными сетями и через них – с национальной электрической сетью. Электроэнергия от микросетей будет направляться к потребителям и обратно в региональную сеть в зависимости от условий спроса и предложения. Мониторинг и регулирование в режиме реального времени обеспечат информационный обмен и позволят мгновенно обрабатывать все поставки на национальном уровне. Потребители в этом случае будут иметь возможность корректировки поставок электричества в соответствии со своими потребностями.

Будучи автономными или подключенными к национальной энергетической сети, микросети могут размещаться в непосредственной близости от потребителей (небольших городов, деревень, заводов) и производить

электроэнергию «на месте», существенно снижая потери на передачу электроэнергии и повышая КПД.

Smart-микросети позволяют эффективно покрывать растущий потребительский спрос за счет роста поступлений электроэнергии от возобновляемых источников энергии. В микросети энергетические ресурсы не могут быть полностью «распланированы», интеллектуальные системы сочетаются с коммуникационной инфраструктурой, чтобы обеспечить контроль на стороне спроса, и посредством него – баланс между спросом и предложением.

ВЫВОДЫ

1. SMART GRID представляет собой сверхуправляемую, интеллектуальную, распределенную, самодиагностирующуюся и самовосстанавливающуюся систему, состоящую из информационно-телекоммуникационной и электроэнергетической частей, в которой активно-адаптивными сетями объединены в единое информационно-коммутиционное пространство комплекс электрооборудования и клиенты, которые одновременно могут являться потребителями и производителями электроэнергии.

2. SMART GRID – симбиоз электроэнергетики, электроники, информационных технологий, телекоммуникаций, сенсоров, программного обеспечения и математики.

3. Традиционно рассчитываемые режимные параметры в условиях SMART GRID являются наблюдаемыми, поэтому большинство задач управления режимами, характерных для традиционных городских распределительных сетей, в условиях SMART GRID в будущем теряют свою актуальность.

4. Задачи управления режимами городских электрических сетей в условиях SMART GRID требуют применения более сложных и дорогих многоуровневых математических моделей, учитывающих влияние разнообразных средств регулирования, режимную реакцию активно-адаптивной части сетей и распределенной малой генерации, в том числе использующей нетрадиционные источники энергии.

5. Основное направление развития автоматической системы управления режимами городских электрических сетей в условиях SMART GRID – разработка методов и алгоритмов распределенных расчетов на основе многоуровневых математических моделей с использованием блочно-параллельной обработки данных в условиях распределенных высокопроизводительных вычислительных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов, В. А. Городские распределительные электрические сети / В. А. Козлов. Л.: Энергоиздат, 1982. 224 с.
2. Фурсанов, М. И. Программно-вычислительный комплекс GORSR для расчета и оптимизации распределительных (городских) электрических сетей 10 (6) кВ / М. И. Фурсанов,

- A. Н. Муха // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2000. № 3. С. 34–39.
3. Кобец, Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SMART GRID / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. М.: ИАЦ Энергия, 2010. 208 с.
4. SMART GRID или умные сети электроснабжения [Электронный ресурс] // Энэка. Инженерно-консалтинговая компания. Режим доступа: http://www.eneca.by/ru_smartgrid0/. Дата доступа: 02.03.2016.
5. Интеллектуальные электрические сети в России – предпосылки [Электронный ресурс] // Умные сети и интеллектуальные энергетические системы. Режим доступа: <http://venture-biz.ru/energetika-energoberezhnie/290-intellektualnye-seti>. Дата доступа: 02.03.2016.
6. Савина, Н. В. Инновационное развитие электроэнергетики на основе технологий SMART GRID / Н. В. Савина. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2014. 136 с.
7. Энергетика, SMART GRID, интеллектуальные транспортные сети. Практические возможности в России / А. В. Конев [и др.] // Rational Enterprise Management = Рациональное Управление Предприятием. 2014. № 1. С. 30–33.
8. Методические рекомендации по автоматизации распределительных электрических сетей 0,4–10 (6) кВ Белорусской энергосистемы: СТП 09110.47.104–11: стандарт ГПО «Белэнерго». Минск: Белэнерго, 2011. 36 с.
9. Фурсанов, М. И. Учет потребительских энергоисточников в расчетах распределительных электрических сетей 6–10 кВ / М. И. Фурсанов, А. А. Золотой, В. В. Макаревич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2011. № 4. С. 11–15.

Поступила 04.05.2017 Подписана в печать 05.07.2017 Опубликована онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Kozlov V. A. (1982) *City Distribution Electric Networks*. Leningrad, Energoizdat Publ. 224 (in Russian).
2. Fursanov M. I., Mukha A. N. (2000) A Software Package of GORSR for the Calculation and Optimization of the Distribution (Urban) Electrical 10 (6) kV Networks. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. (3), 34–39 (in Russian).
3. Kobets B. B., Volkova I. O. (2010) *Innovative Development of Power Industry on the Basis of the SMART GRID Concept*. Moscow, Energiya Publ., 208 (in Russian).
4. SMART GRID or the Smart Grids of Energy Supply. *Eneka. Engineering and Consulting Company*. Available at: http://www.eneca.by/ru_smartgrid0/. (Accessed: 02.03.2016) (in Russian).
5. Smart Grids in Russia: the Prerequisites. *Smart Grids and Intelligent Energy Systems*. (2011, 15.09). Available at: <http://venture-biz.ru/energetika-energoberezhnie/290-intellektualnye-seti>. (Accessed: 02.03.2016) (in Russian).
6. Savina N. V. (2014) *Innovative Development of Power Generation Based on SMART GRID Technologies*. Blagoveshchensk, Amur State Univ. 136 (in Russian).
7. Konev A. V., Kupriyanovskii V. P., Badalov A. Yu., Bogdanov A. G., Volkov S. A., Sinyagov S. A. (2014) Power Engineering, SMART GRID, Intelligent Transport Networks. Practical Possibilities in Russia. *Rational Enterprise Management = Ratsional'noe Upravlenie Predpriyatiem*, (1), 30–33 (in Russian).
8. Enterprise Standard 09110.47.104–11. Guidelines for the Automation of Distribution Electrical Networks of 0.4–10 (6) kV of the Belarusian Energy System. Minsk, Belenergo. 36 (in Russian).
9. Fursanov M. I., Zalatoi A. A., Makarevich V. V. (2011) Account of Consumer Power Sources in Calculations of Distributive Electrical Networks of 6–10 kV. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 11–15 (in Russian).

Received: 4 May 2017

Accepted: 5 July 2017

Published online: 29 September 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-407-416

УДК 621.311.22

Эффективность контроля достоверности измерений в автоматизированных системах управления энергосистемами по предельным значениям

В. А. Анищенко¹⁾, Т. В. Писарук¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Высокий уровень эксплуатационной надежности энергетических систем практически невозможно обеспечить без оперативного контроля достоверности измерений переменных (электрических токов, напряжений, мощностей, энергий, температур, давлений), характеризующих состояние энергетического оборудования и технологические процессы. Реформирование и переход энергетики на рыночные отношения вынуждают повышать требования к достоверности измерительной информации. Недостоверные измерения являются потенциальным источником ошибочной диагностики неисправностей оборудования, приводят к неправильной работе противоаварийной автоматики и ошибочным действиям оперативного персонала при управлении технологическими процессами. Оперативные методы контроля достоверности, повышающие эксплуатационную надежность измерительной информации, основываются на использовании семантического значения измеряемых данных, их логичности, технологической непротиворечивости и согласованности. Эти методы используют технологический смысл измеряемых переменных и дополняют методы аппаратного контроля состояния автоматизированных систем управления на основе цифровых кодов, что повышает общую эксплуатационную надежность передачи, сбора и обработки информации. Наиболее распространенный семантический метод контроля – метод предельных значений («виллок»), когда числовое значение измеряемой переменной сравнивается с верхней и нижней границами достоверных значений. Недостатком метода предельных значений во многих случаях является его низкая разрешающая способность, обусловленная широким диапазоном, в котором располагаются достоверные результаты измерений. Это неоправданно сильно снижает вероятность обнаружения грубых и систематических погрешностей измерения. В связи с этим актуальна задача обоснованного сужения диапазона достоверных значений переменных, для решения которой используется теория статистических решений.

Ключевые слова: энергосистема, измерительная информация, контроль достоверности измерений, ложная тревога, пропуск грубой погрешности, разрешающая способность контроля

Для цитирования: Анищенко, В. А. Эффективность контроля достоверности измерений в автоматизированных системах управления энергосистемами по предельным значениям / В. А. Анищенко, Т. В. Писарук // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 5. С. 407–416. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-407-416

Адрес для переписки

Анищенко Вадим Андреевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-52
epp@bntu.by

Address for correspondence

Anishchenko Vadim A.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-52
epp@bntu.by

The Effectiveness of Validation Measurements in Automated Systems of the Power Supply Systems Control in Accordance with Limit Values

V. A. Anishchenko¹⁾, T. V. Pisaruk¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A high level of operational reliability of power supply systems is virtually impossible to provide without operational control of the reliability of the measurement variables (currents, voltages, powers, energies, temperatures, pressures) that characterize the condition of power equipment and technological processes. Reforming the power engineering and its transition to market relations necessitate one to toughen the requirements for the reliability of the measuring information. Inaccurate measurements are a potential source of misdiagnosis of malfunctions of equipment and they cause incorrect operation of emergency control equipment and erroneous actions of operating personnel in the control of technological processes. Operational methods of reliability control that enhance the operational reliability of the measuring information are based on the usage of the semantic value of the measured data, their consistency, process consistency, and consistency of balance. These methods use technological sense of the measured variables and they complement the methods of hardware status monitoring of automated control systems based on digital codes. That improves the overall operational reliability of the transmission, collection and processing of information. The most common semantic method of control is the method of limits (“fork”) that compares the numeric value of the measured variable with the upper and lower boundaries of valid values. The disadvantage of limit values in many cases is its poor resolution, due to the wide range of appearance of results of measurements. This reduces the probability of detection of gross and systematic errors of measurements more than it may be accepted. With this regard, the objective of a reasonable narrowing of the range of valid values of the variables, that uses the theory of statistical decisions, acquires high relevance.

Keywords: power system, measurement data, validation of measurements, false alarm, omission of gross errors, resolution of control

For citation: Anishchenko V. A., Pisaruk T. V. (2017) The Effectiveness of Validation Measurements in Automated Systems of the Power Supply Systems Control in Accordance with Limit Values. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (5), 407–416. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-407-416 (in Russian)

Постановка задачи

Необходимым условием семантического программно-логического контроля достоверности измерений является избыточность информации об их значениях. Основу информационной базы составляют результаты прямых (непосредственных) измерений. Дополнительная информация, обеспечивающая избыточность, может быть априорной и апостериорной [1, 2].

Априорная информация представляет собой ретроспективные данные об измеряемых переменных, накапливаемые в процессе работы контролируемого объекта и аналогичных ему, эксплуатируемых в одинаковых условиях. К таким данным относятся границы измерения значений переменных в нормальных условиях работы, вероятностные характеристики, описывающие случайный характер измерений контролируемых переменных, погрешности измеряемой аппаратуры.

Апостериорная избыточность информации может обеспечиваться резервированием измеряемой аппаратуры и путем использования уравнений взаимных связей между измеряемыми переменными.

Контроль достоверности по предельным значениям отдельно взятой переменной без учета ее функциональных зависимостей с другими переменными основан на использовании априорной избыточности информации и представляет собой дихотомическую задачу допускового контроля [3–9].

Результат измерения переменной $x(t)$ признается достоверным, если выполняется условие

$$a(t) \leq x(t) \leq b(t), \quad (1)$$

где $a(t)$, $b(t)$ – нижняя и верхняя границы достоверных значений измеряемой переменной в нормальных условиях эксплуатации, в общем случае зависящие от изменения режимов работы электрооборудования.

На первом этапе контроля отбраковываются наиболее грубые погрешности измерений, попадающие в области вне диапазона $b-a$. Ширина этого диапазона определяет разрешающую способность контроля. Максимальное значение необнаруженной грубой погрешности равно ширине диапазона. Для ряда контролируемых переменных ширина диапазона достоверных значений относительно невелика. Например, для напряжений она соответствует нормированному отклонению от номинального уровня. В то же время для электрических токов и мощностей ширина диапазона может достигать больших величин в зависимости от конфигурации схемы электроснабжения и состава подключенных потребителей. Поэтому на втором этапе контроля производится оптимизация границ принятия решения о достоверности измерения, что позволяет сузить ширину диапазона достоверных значений переменных и тем самым повысить разрешающую способность метода.

Оптимизация границ достоверных измерений по критерию минимума средней цены обнаружения грубых погрешностей

Алгоритм решения задачи поясняет рис. 1. Кривая 1 представляет плоскость распределения вероятности $f_1(x_1)$ достоверного результата измерения $x_1(t)$, состоящего из суммы неизвестного истинного значения переменной $\bar{x}(t)$ и случайной погрешности $\varepsilon(t)$, соответствующей паспортной точности измерительного прибора

$$x_1(t) = \bar{x}(t) + \varepsilon(t). \quad (2)$$

Кривая 2 – плотность распределения вероятности $f_2(x_2)$ недостоверного результата измерений $x_2(t)$ с грубой погрешностью $n(t)$

$$x_2(t) = \bar{x}(t) + \varepsilon(t) + n(t). \quad (3)$$

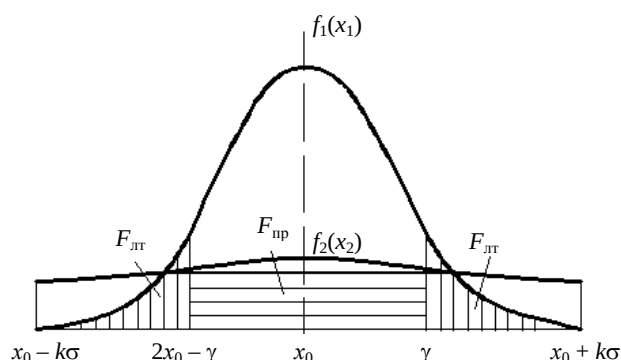


Рис. 1. Вероятностные характеристики достоверных и недостоверных измерений

Fig. 1. Probabilistic characteristics of reliable and unreliable measurements

Величина $x_1(t)$ подвержена статистическому разбросу относительно среднего значения x_0 вследствие изменения состава энергооборудования, условий и различных режимов работы потребителей энергии. Для многих технологических переменных этот разброс описывается нормальным законом распределения

$$f_1(x_1) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[-\frac{(x_1 - x_0)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (4)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение переменной x_1 от среднего значения x_0 .

Значения x_0 и σ определяются методами математической статистики на основе ретроспективной информации, накапливаемой в процессе эксплуатации энергообъектов.

Представим границы достоверных значений переменных $x_1(t)$ в виде:

$$a(t) = x_0 - k\sigma; \quad b(t) = x_0 + k\sigma, \quad (5)$$

где k – квантиль, определяющий степень усечения нормального распределения переменной $x_1(t)$.

С учетом (5) условие достоверности измерений (1) примет вид

$$x_0 - k\sigma \leq x_1(t) \leq x_0 + k\sigma. \quad (6)$$

Выбор квантиля k носит спорный характер. В энергетике часто используют значение $k = 3$ (правило «трех сигм»). Оно определяет попадание достоверных измерений в диапазон $\pm 3\sigma$ с вероятностью 0,997.

Обозначив через γ верхнюю оптимальную границу принятия решения о достоверности измерения, получим симметричную нижнюю границу $2x_0 - \gamma$. Тогда условие достоверности измерений, соответствующее оптимальным границам, будет выглядеть следующим образом:

$$2x_0 - \gamma \leq x_1(t) \leq \gamma. \quad (7)$$

Оптимизация границ принятия решения о достоверности измерения осуществляется известными методами статистических решений [10, 11]. Согласно критерию Байеса, минимум средней цены многократного обнаружения грубых погрешностей измерений определяется выражением

$$C_{cp} = (1-q)C_{лт}F_{лт} + qC_{пр}F_{пр} = \min, \quad (8)$$

где q – априорная вероятность грубой погрешности измерения; $C_{лт}$ – цена ложной тревоги (ошибочного решения о появлении грубой погрешности, когда на самом деле измерение достоверно); $C_{пр}$ – цена пропуска грубой погрешности (ошибочного решения о достоверности измерения); $F_{лт}$ – вероятность ложной тревоги; $F_{пр}$ – вероятность пропуска грубой погрешности.

Вероятность $F_{лт}$ определяется формулой

$$F_{лт} = 2 \int_{\gamma}^{x_0 + k\sigma} f_1(x_1) dx. \quad (9)$$

Распределение грубых погрешностей измерений с учетом их предварительной отбраковки по условию (6) при $k = 3$ принимаем равномерным

$$f(n) = \frac{1}{12\sigma}. \quad (10)$$

Тогда закон распределения недостоверных результатов измерений с учетом (3) описывается выражением

$$f_2(x_2) = \frac{1}{12\sigma} \left[\Phi\left(\frac{x_0 + 3\sigma - \gamma}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_0 - 3\sigma - \gamma}{\sigma}\right) \right], \quad (11)$$

где $\Phi\left(\frac{x_0 + 3\sigma - \gamma}{\sigma}\right)$, $\Phi\left(\frac{x_0 - 3\sigma - \gamma}{\sigma}\right)$ – нормированные функции Лапласа [10].

Вероятность пропуска грубой погрешности

$$F_{пр} = 2 \int_{x_0}^{\gamma} f_2(x_2) dx. \quad (12)$$

Для нахождения минимума средней цены многократного обнаружения грубых погрешностей в зависимости от границ достоверности вычисляем

первую производную $\frac{dC_{cp}}{d\gamma}$ с учетом (9), (12) и приравниваем ее к нулю

$$\frac{dC_{cp}}{d\gamma} = (1-q)C_{лт}f_1(\gamma) + qC_{пр}f_2(\gamma) = 0. \quad (13)$$

Из (13) получаем

$$\wedge = \frac{f_2(\gamma)}{f_1(\gamma)} = \frac{(1-q)C_{лт}}{qC_{пр}}, \quad (14)$$

где $\wedge$ – коэффициент правдоподобия, соответствующий верхней оптимальной границе $\gamma_{опт}$ [11, 12].

Согласно [13], вероятность грубых погрешностей при выполнении функций сбора и предварительной обработки измерительной информации достигает величины $q = 0,05$. Оптимальные границы достоверности измерений должны учитывать возможность последствий ложной тревоги и пропуска грубой погрешности. Например, в задачах, связанных с работой устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики, следует учитывать, с одной стороны, недоотпуск электроэнергии из-за ошибочного

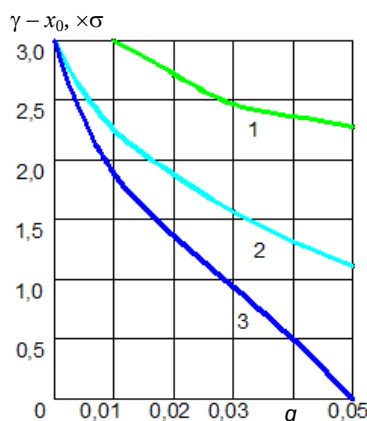


Рис. 2. Оптимальная граница достоверных измерений по критерию минимума средней цены обнаружения грубых погрешностей

Fig. 2. The optimal boundary of reliable measurements with the criterion of the minimum average price of the detection of rough errors

отключения контролируемого объекта, а с другой – отрицательные последствия работы неотключенного объекта в ненормальных и аварийных условиях. В большинстве случаев принимается, что цена пропуска грубой погрешности существенно превышает цену ложной тревоги ($C_{пр} \gg C_{лт}$). Выбор цен $C_{пр}$, $C_{лт}$ в определенной степени облегчается благодаря тому, что отсутствует необходимость определять их в абсолютных величинах, а достаточно ограничиться их отношением. Зависимости оптимальной верхней границы достоверности от цен ошибочных решений при ее определении и априорной вероятности грубой погрешности представлены на рис. 2, где кривая 1 соответствует отношению $C_{пр}/C_{лт} = 10$; кривая 2 – $C_{пр}/C_{лт} = 50$; кривая 3 – $C_{пр}/C_{лт} = 100$.

Оптимизация границ достоверных измерений по критерию минимакса

Понятие грубой погрешности измерения носит расплывчатый характер и допускает его произвольное толкование. Обычно погрешностям измерений придают какие-либо полезные статистические характеристики, на основе которых обосновывают отличие грубой погрешности от допустимой. Интуитивно под грубой понимают погрешность, явно искажающую результат измерения. Попытки ее формализации с целью однозначной количественной оценки сводятся к сравнению значения соответствующей статистики при заданном уровне значимости с квантилем стандартного распределения (критерии «трех сигм», Шовене, Романовского и др.). Однако это не решает проблему, а только переносит неопределенность понятия грубой погрешности на выбор уровня значимости и квантиля распределения.

Вторая трудность контроля достоверности состоит в большой неопределенности цен ложной тревоги и пропуска грубой погрешности. Как правило, их можно оценить только приблизительно.

В рассмотренных обстоятельствах альтернативой контроля по критерию минимума средней цены (9) является контроль по критерию минимакса [11, 12, 14]

$$C = (1 - q)C_{\text{лт}} + qC_{\text{пр}} = \min \max; \quad q = \text{var}; \quad \frac{C_{\text{пр}}}{C_{\text{лт}}} = \text{var}. \quad (15)$$

Суть такого подхода заключается в нахождении границы γ , гарантирующей наименьшее значение цены обнаружения грубой погрешности при самых «неблагоприятных» значениях вероятности q и цен $C_{\text{пр}}$, $C_{\text{лт}}$.

Минимальное значение C соответствует минимальному отклонению по модулю $\Delta\gamma_{ij}$ оптимальных границ γ_i , определенных по критерию (8) из условия равенства истинных и фактических значений параметров q , $C_{\text{лт}}$, $C_{\text{пр}}$ от определенной по критерию (15) общей оптимальной для всех этих параметров границы $\gamma_j^{\text{опт}}$

$$C = \Delta\gamma_{ij} = |\gamma_i - \gamma_j| = \min \max; \quad \gamma_i = \text{var}; \quad \gamma_j = \text{var}. \quad (16)$$

При этом в качестве общей границы рассматриваются все возможные по (8) оптимальные границы достоверности γ_j для всех значений параметров q , $C_{\text{лт}}$, $C_{\text{пр}}$.

Все возможные значения $\Delta\gamma_{ij}$ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Возможные значения отклонений $\Delta\gamma_{ij} \times \sigma$
The possible values of the deviations of $\Delta\gamma_{ij} \times \sigma$

$\frac{C_{\text{пр}}}{C_{\text{лт}}}$	10	10	10	10	10	50	50	50	50	50	100	100	100	100	100
q	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
$\gamma_i \times \sigma$	3,00	2,70	2,47	2,32	2,22	2,25	1,8	1,55	1,35	1,10	1,80	1,35	0,90	0,50	0
$\gamma_i = 3,00$	0	-0,3	-0,53	-0,68	-0,78	-0,75	-1,2	-1,45	-1,65	-1,9	-1,2	-1,65	-2,1	-2,5	-3
$\gamma_j = 2,70$	0,3	0	-0,23	-0,38	-0,48	-0,45	-0,9	-1,15	-0,35	-1,6	-0,9	-1,35	-1,8	-2,2	-2,7
$\gamma_j = 2,47$	0,53	0,23	0	-0,15	-0,25	-0,22	-0,67	-0,92	-1,12	-1,37	-0,67	-1,12	-1,57	-1,97	-2,47
$\gamma_j = 2,32$	0,68	0,38	0,15	0	-0,1	-0,07	-0,52	-0,77	-0,97	-1,22	-0,52	-0,97	-1,42	-1,82	-2,32
$\gamma_j = 2,22$	0,78	0,48	0,25	0,1	0	0,03	-0,42	-0,67	-0,87	-1,12	-0,42	-0,87	-1,32	-1,72	-2,22
$\gamma_j = 2,25$	0,75	0,45	0,22	0,07	-0,03	0	-0,45	-0,7	-0,9	-1,15	-0,45	-0,9	-1,35	-1,75	-2,25
$\gamma_j = 1,8$	1,2	0,9	0,67	0,52	0,42	0,45	0	-0,25	-0,45	-0,7	0	-0,45	-0,9	-1,3	-1,8
$\gamma_j = 1,55$	1,45	1,15	0,92	0,77	0,67	0,7	0,25	0	-0,2	-0,45	0,25	-0,2	-0,65	-1,05	-1,55
$\gamma_j = 1,35$	1,65	1,35	1,12	0,97	0,87	0,9	0,45	0,2	0,05	-0,25	0,45	0	-0,45	-0,85	-1,35
$\gamma_j = 1,10$	1,9	1,6	1,37	1,22	1,12	1,15	0,7	0,45	0,25	0	0,7	0,25	-0,2	-0,6	-1,1
$\gamma_j = 1,80$	1,2	0,9	0,67	0,52	0,42	0,45	0	-0,25	-0,45	-0,7	0	-0,45	-0,9	-1,3	-1,8
$\gamma_j = 1,35$	1,65	1,35	1,12	0,97	0,87	0,9	0,45	0,2	0	-0,25	0,45	0	-0,45	-0,85	-1,35
$\gamma_j = 0,90$	2,1	1,8	1,57	1,42	1,32	1,35	0,9	0,65	0,45	0,2	0,9	0,45	0	-0,4	-0,9
$\gamma_j = 0,50$	2,5	2,2	1,97	1,82	1,72	1,75	1,3	1,05	0,85	0,6	1,3	0,85	0,4	0	-0,5
$\gamma_j = 0,00$	3,00	2,70	2,47	2,32	2,22	2,25	1,8	1,55	1,35	1,10	1,80	1,35	0,90	0,50	0

Влияние изменений величин параметров q , $C_{лт}$, $C_{пр}$ на отклонения $\Delta\gamma_{ij}$ от оптимальной границы $\gamma_j^{опт} = 1,55$, определенные по критерию минимакса (16), показано на рис. 3, где кривая 1 соответствует отношению $C_{пр}/C_{лт} = 10$; кривая 2 – $C_{пр}/C_{лт} = 50$; кривая 3 – $C_{пр}/C_{лт} = 100$.

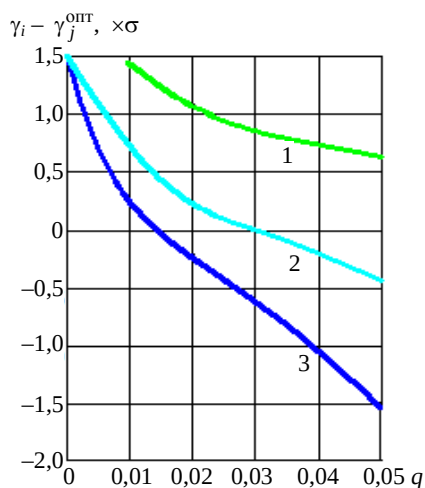


Рис. 3. Отклонения $\Delta\gamma_{ij}$ от оптимальной общей границы $\gamma_j^{опт} = 1,55$

Fig. 3. The deviations of $\Delta\gamma_{ij}$ from the optimal general border $\gamma_j^{опт} = 1.55$

Разрешающая способность контроля достоверности измерений по предельным значениям

Эффективность оперативного контроля достоверности измерений по предельным значениям можно оценить его разрешающей способностью. В общем случае под разрешающей способностью понимают минимальные значения различий, обнаруживаемых измерительным прибором в однородных явлениях. В рассматриваемой задаче контроля разрешающая способность (РС) определяет наименьшее значение грубой погрешности, которое позволяет выявить контроль по предельным значениям.

Обоснованный суженный диапазон достоверных измерений по сравнению с диапазоном, определенным по правилу «трех сигм», повышает разрешающую способность контроля в процентном выражении на величину

$$\Delta PC = \frac{x_0 + 3\sigma - \gamma_{опт}}{x_0 + 3\sigma} \cdot 100 \%. \quad (17)$$

Наибольшее повышение разрешающей способности достигается посредством контроля достоверности по критерию минимума средней цены многократного распознавания грубой погрешности (8). По этому критерию, исходя из значений отклонений, приведенных в табл. 1, определяем повышение разрешающей способности контроля достоверности при различных значениях параметров q , $C_{лт}$, $C_{пр}$. Результаты расчета представлены на рис. 4, где кривая 1 соответствует отношению $C_{пр}/C_{лт} = 10$; кривая 2 – $C_{пр}/C_{лт} = 50$; кривая 3 – $C_{пр}/C_{лт} = 100$.

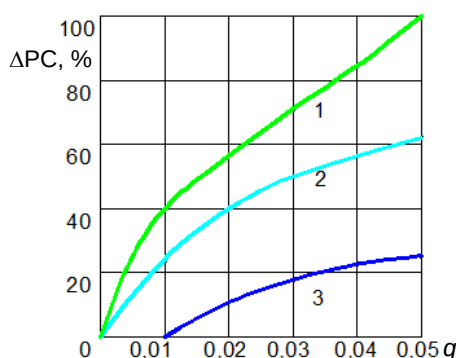


Рис. 4. Повышение разрешающей способности контроля достоверности по критерию минимума средней цены обнаружения грубых погрешностей

Fig. 4. Increase of the resolution validation according the criterion of minimum average rates of detection of rough errors

ВЫВОДЫ

1. Эффективность оперативного контроля достоверности измерений в автоматизированных системах управления энергосистемами по предельным значениям существенно зависит от ширины диапазона достоверных результатов измерений. Обоснованное сужение диапазона на основе теории статистических решений позволит повысить разрешающую способность контроля и его эффективность.

2. При известной априорной информации о вероятности грубой погрешности измерения и ценах ложной тревоги и пропуска грубой погрешности оптимальное сужение границы достоверности измерения определяется по критерию минимума средней цены многократного распознавания недостоверного измерения.

3. При отсутствии надежной исходной информации о вероятности грубой погрешности и ценах ошибочных решений оптимизация границ достоверных измерений производится по критерию минимума максимально возможной цены многократного распознавания недостоверного измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мамиконов, А. Г. Достоверность, защита и резервирование информации в АСУ / А. Г. Мамиконов, В. В. Кульба, А. Б. Шелков. М.: Энергоатомиздат, 1986. 304 с.
2. Терновых, Ю. П. Информационная избыточность и контроль достоверности в системах управления / Ю. П. Терновых, Ю. И. Жамков // Приборы и системы управления. 1976. № 5. С. 7–8.
3. Зингер, И. С. Обеспечение достоверности данных в автоматизированных системах управления производством / И. С. Зингер, Б. С. Куцык. М.: Наука, 1974. 298 с.
4. Шаракшанэ, А. С. Сложные системы / А. С. Шаракшанэ, И. Г. Железнов, В. А. Ивницкий. М.: Высш. шк., 1977. 248 с.
5. Ицкович, Э. Л. Контроль производства с помощью вычислительных машин / Э. Л. Ицкович. М.: Энергия, 1975. 416 с.
6. Контроль достоверности оперативной информации в автоматизированной системе диспетчерского управления энергетической системой / И. О. Кнеллер [и др.] // Электричество. 1977. № 4. С. 5–10.

7. Анищенко, В. А. К задаче контроля достоверности информации в АСУ ТП электростанций / В. А. Анищенко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 1985. № 8. С. 16–20.
8. Анищенко, В. А. Надежность измерительной информации в системах электроснабжения / В. А. Анищенко. Минск: БГПА, 2000. 128 с.
9. Анищенко, В. А. Общая структура контроля достоверности измерений взаимосвязанных параметров энергетических объектов / В. А. Анищенко, Т. Н. Казанская // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 1989. № 9. С. 33–37.
10. Смирнов, Н. В. Курс теории вероятности и математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. М.: Наука, 1969. 512 с.
11. Горелик, А. Л. Методы распознавания / А. Л. Горелик, В. А. Скрипкин. М.: Высш. шк., 1984. 208 с.
12. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
13. Ринкус, Э. К. Нормирование показателей надежности АСУ ТП энергоблоков ТЭС / Э. К. Ринкус // Теплоэнергетика. 1996. № 1. С. 57–61.
14. Анищенко, В. А. Контроль достоверности измерений в энергетических системах на основе теории статистических решений / В. А. Анищенко // Энергетика. Изд. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2003. № 6. С. 5–15.

Поступила 28.03.2017 Подписана в печать 02.06.2017 Опубликована онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Mamikonov A. G., Kul'ba V. V., Shelkov A. B. (1986) *Reliability, Protection and Redundancy of Information in the ACS*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 304 (in Russian).
2. Ternovykh Yu. P., Zhamkov Yu. I. (1976) Information Redundancy and Reliability Control in Control Systems. *Pribory i Sistemy Upravleniya* [Instruments and Systems of Monitoring], (5), 7–8 (in Russian).
3. Zinger I. S., Kutsyk B. S. (1974) *Ensuring Data Reliability in Automated Production Control Systems*. Moscow, Nauka Publ. 298 (in Russian).
4. Sharakshane A. S., Zheleznov I. G., Ivnikskii V. A. (1977) *Complex Systems*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 248 (in Russian).
5. Itskovich E. L. (1975) *Production Control with the Use of Computers*. Moscow, Energiya Publ. 416 (in Russian).
6. Kneller I. O., Oranskii A. G., Kolomyichenko A. V. [et al.] (1977) Validation of the Operational Information in the Automated System of Dispatching Control of Energy System. *Elektrichestvo = Electricity*, (4), 5–10 (in Russian).
7. Anishchenko V. A. (1985) Towards the Objective of Monitoring the Accuracy of Information in the Process Control System of Power Plants. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii*. [Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions], (8), 16–20 (in Russian).
8. Anishchenko V. A. (2000) *The Reliability of Measurement Data in Power Systems*. Minsk, Belarusian State Polytechnic Academy. 128 (in Russian).
9. Anishchenko V. A., Kazanskaya T. N. (1989) The Overall Structure of the Validation Measurements of Interdependent Parameters of the Power Facilities. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii*. [Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions], (9), 33–37 (in Russian).
10. Smirnov N. V., Dunin-Barkovskii I. V. (1969) *Training Course of Probability Theory and Mathematical Statistics for Technical Applications*. Moscow, Nauka Publ. 512 (in Russian).
11. Gorelik A. L., Skripkin V. A. (1984) *Methods of Recognition*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 208 (in Russian).
12. Birger I. A. (1978) *Technical Diagnostics*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 240 (in Russian).
13. Rinkus E. K. (1996) Rationing of Indicators of Reliability of ACS of a Heating Unit of Power Units. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, (1), 57–61 (in Russian).
14. Anishchenko V. A. (2003) Control the Reliability of Measurements in Power Systems Based on Statistical Decision Theory. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 5–15 (in Russian).

Received: 28 March 2017

Accepted: 2 June 2017

Published online: 29 September 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-417-432

УДК 621.316

Эффективность применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена

Часть 1

М. А. Короткевич¹⁾, С. И. Подгайский²⁾, А. В. Голомуздов²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾ПО «Энергокомплект» (Витебск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Оценка целесообразности применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению с кабелями на те же напряжения с бумажно-масляной изоляцией выполнена на основе критерия приведенных затрат. При этом сравнивались между собой кабели различных конструктивных исполнений и материала изоляции: трехжильные с бумажной изоляцией и трехжильные с изоляцией из сшитого полиэтилена; трехжильные с бумажной изоляцией и одножильные с изоляцией из сшитого полиэтилена; одножильные маслонаполненные кабели напряжением 110 кВ с бумажной изоляцией и одножильные кабели напряжением 110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Увеличение длительно допустимого тока нагрузки на кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена из-за большей допустимой температуры его нагрева по сравнению с кабелями с бумажно-масляной изоляцией соответствует как бы увеличению площади поперечного сечения жил кабеля (в размере до 0,61 от первоначальной) и, следовательно, обеспечивает снижение стоимости кабеля за счет снижения стоимости изготовления токопроводящих жил. Приведенные затраты на сооружение и эксплуатацию кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена (при повышении стоимости кабеля в 1,2 и 2 раза по сравнению со стоимостью кабеля с трехжильной изоляцией), несмотря на снижение затрат на изготовление токопроводящих жил и сниженные годовые эксплуатационные расходы (на 9 и 17 % соответственно кабельные линии напряжением до 35 и 110 кВ), оказываются большими приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию кабельных линий с бумажной изоляцией. В настоящее время стоимость одного метра кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена меньше стоимости кабелей типов ААБ, ЦАСБ, ААШв напряжением 10 кВ с алюминиевыми жилами, что обеспечивает безусловную эффективность их применения.

Ключевые слова: кабельные линии электропередачи, сшитый полиэтилен, бумажно-масляная изоляция, приведенные затраты, стоимость производства кабелей, капитальные вложения

Для цитирования: Короткевич, М. А. Эффективность применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Часть 1 / М. А. Короткевич, С. И. Подгайский, А. В. Голомуздов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 5. С. 417–432. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-417-432

Адрес для переписки

Короткевич Михаил Андреевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-82
elsyst@bntu.by

Address for correspondence

Korotkevich Mikhail A.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-82
elsyst@bntu.by

The Efficacy of the Cables of 6–110 kV with XLPE Insulation

Part 1

M. A. Korotkevich¹⁾, S. I. Podgaitskiy²⁾, A. V. Golomuzdov²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾JSC “Energokomplekt” Industrial Association (Vitebsk, Republic of Belarus)

Abstract. The assessment of the suitability of cables of 6–110 kV with XLPE insulation in comparison with cables of the same voltage but possessing paper-oil insulation has been fulfilled on the basis of the criterion of reduced costs. Thus, the comparison was undertaken between cables of various design and material of insulation: three-core paper insulated ones vs. three-core XLPE insulated ones; three-core paper-insulated ones vs. solid wires with XLPE insulation; single-core oil-filled cables of 110 kV with paper insulation vs. solid wires of 110 kV with XLPE insulation. The increase in long-term permissible current loads for cables with XLPE insulation because of the larger permissible temperature of heating in comparison with cables with paper-oil insulation complies with as would increase in the cross-sectional area of cable cores (equal to 0.61 from the original) and therefore reduces the cost of the cable by reducing the cost of manufacture of conductors. The reduced costs of the construction and operation of cable lines with XLPE insulation (accounting the increase in the cost of a cable 1.2 and 2 times as compared with the cost of a cable with three-core insulation), despite the decline in the cost of manufacture of conductors and the reduced annual operating costs (9 % and 17 % respectively of cable lines of voltage of up to 35 kV and 110 kV), occurred to be more than the reduced costs of the construction and operation of cable lines with paper insulation. Currently the cost of one meter of cable with XLPE insulation is less than the cost of cables of AAB, CASB, AASv types of a voltage of 10 kV with aluminium cores, that ensures their undeniable efficacy.

Keywords: cable transmission lines, XLPE, paper-oil insulation, reduced costs, production cost of the cables, capital investments

For citation: Korotkevich M. A., Podgaitskiy S. I., Golomuzdov A. V. (2017) The Efficacy of the Cables of 6–110 kV with XLPE Insulation. Part 1. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (5), 417–432. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-417-432 (in Russian)

Введение

В последние годы в электрических сетях стали применять трехжильные кабели на напряжение 6–35 кВ, а также одножильные кабели на напряжение до 110 кВ с полиэтиленовой изоляцией. Несмотря на более высокую стоимость по сравнению со стоимостью кабелей с бумажно-масляной изоляцией, они обладают неоспоримыми преимуществами перед кабелями с бумажно-масляной изоляцией:

- значительно меньшей повреждаемостью (на один-два порядка);
- меньшей массой;
- неограниченной разностью уровней прокладки (у кабелей с бумажно-масляной изоляцией отмеченная разность не должна превышать 15 м);
- возможностью изготовления кабелей площадью сечения жил до 1200 мм² (вместо 240 мм² у кабелей с бумажно-масляной изоляцией);
- более высоким током термической стойкости (допустимая температура нагрева 250 °С вместо 200 °С);

- большей пропускной способностью за счет более высокой допустимой температуры нагрева жил (90 °С вместо 70 °С);
- меньшим допустимым радиусом изгиба;
- возможностью прокладки при температуре до минус 20 °С без предварительного подогрева;
- более высоким сопротивлением изоляции при рабочей температуре жил и, следовательно, меньшими диэлектрическими потерями (особенно при напряжении 110 кВ).

Выпускаемые предприятием «Энергокомплект» кабели различаются по выполнению разделительных слоев до медного экрана (первый слой) и после него (второй слой), наличием брони (трехжильные кабели напряжением 6–35 кВ) или ее отсутствием (одножильные кабели напряжением 6–110 кВ), наличием внутренней оболочки (одножильные кабели напряжением 6–110 кВ с алюминиевыми жилами и трехжильные кабели напряжением 6–35 кВ с медными жилами) и ее отсутствием (одножильные кабели с медными жилами напряжением 6–110 кВ).

Целесообразность применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению с кабелями с бумажно-масляной изоляцией рассмотрим применительно к кабельным линиям, выполненным кабелями:

- трехжильными площадью поперечного сечения жил 35–240 мм² напряжением 6–35 кВ;
- одножильными площадью поперечного сечения жил 35–240 мм² (кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена) и трехжильными площадью поперечного сечения жил 35–240 мм² (кабели с бумажно-масляной изоляцией) напряжением 6–35 кВ;
- одножильными площадью поперечного сечения жил 150, 185, 240, 300, 400, 500, 630 мм² (кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена) и одножильными тех же площадей поперечного сечения жил (кабели маслонаполненные с бумажно-масляной изоляцией) напряжением 110 кВ.

Для оценки указанной целесообразности применения силовых электрических кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена по отношению к кабелям с пропитанной бумажной изоляцией воспользуемся как методом приведенных затрат, так и методом многоцелевой оптимизации [1, 2].

Определение приведенных затрат

Приведенные ежегодные затраты на сооружение и эксплуатацию кабельной линии $K_{к.л}$ и расходов на ее эксплуатацию I записываются как

$$З = E_k K_{к.л} + I, \quad (1)$$

где E_k – коэффициент эффективности капитальных вложений (при ставке рефинансирования Национального банка Республики Беларусь, равной 15 %, $E_k = 0,15$).

Рассмотрим соотношение составляющих выражения (1), относящихся к кабельным линиям с кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена и бумажно-масляной изоляцией.

Капитальные затраты на сооружение кабельной линии

Указанные затраты $K_{к.л.}$ состоят из затрат на приобретение кабеля K_k и затрат на его прокладку $K_{п.}$

В суммарной стоимости сооружения кабельных линий стоимость кабелей составляет в среднем 48 % для линий напряжением 6–10 кВ; 57,5 % – для линий напряжением 35 кВ [3]; 23–52 % или в среднем 37,5 % – для линий напряжением 20 кВ [4] и 33 % – для линий напряжением 110 кВ [3],

т. е. $\frac{K_k}{K_{к.л.}} = 0,48; 0,375; 0,575$ и $0,33$ соответственно для кабельных линий напряжением 6–10; 20; 35 и 110 кВ.

Стоимость прокладки трехжильных кабелей с вязкой или искусственной изоляцией можно считать одинаковой и равной 52; 62,5; 42,5; 67 % от суммарной стоимости кабельной линии соответственно для линий напряжением 6–10; 20; 35 и 110 кВ. Здесь стоимость прокладки оценивалась как

$$K_{п.} = \left(1 - \frac{K_k}{K_{к.л.}}\right) K_{к.л.} \quad (2)$$

Отношение стоимости сооружения кабельной линии с кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена $K_{к.л.}^п$ к стоимости сооружения кабельной линии с кабелями с бумажно-масляной изоляцией $K_{к.л.}$ представим в виде

$$\frac{K_{к.л.}^п}{K_{к.л.}} = 1 + \frac{\alpha_2 - 1}{\alpha_1}, \quad (3)$$

где $\alpha_1 = \frac{K_{к.л.}}{K_k}$ – коэффициент, учитывающий, во сколько раз стоимость сооружения кабельной линии превышает стоимость собственно кабеля, значение α_1 равно 2,08; 2,67; 1,74 и 3,3 соответственно для линий напряжением 6–10; 20; 35 и 110 кВ; $\alpha_2 = \frac{K_k^п}{K_k}$ – коэффициент, учитывающий увеличение стоимости кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению со стоимостью кабеля с комбинированной изоляцией, значение α_2 больше единицы, но хотелось бы, чтобы оно было равно или меньше единицы.

При $\alpha_2 \leq 1$ стоимость сооружения кабельной линии с кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена не превышает стоимости сооружения кабельной линии с кабелем с бумажно-масляной изоляцией.

Если $\alpha_2 > 1$ ($\alpha_2 = 1,2$ (1,5; 2,0)), то стоимость сооружения кабельной линии с кабелем с искусственной изоляцией выше стоимости сооружения кабельной линии с кабелем с комбинированной изоляцией.

Значение $\alpha_2 < 1$ имеет место, например, при сравнении стоимости сооружения кабельной линии с кабелем с полиэтиленовой изоляцией со стоимостью сооружения кабельной линии с кабелем с бумажной изоляцией, пропитанной нестекающим изоляционным составом, например, церезином (кабели, предназначенные для прокладки на вертикальных и наклонных трассах без ограничения разности уровней, например, кабель типа ЦАСБ).

Соотношения стоимостей сооружения кабельных линий с кабелями с различной изоляцией, определенные по (3), приведены в табл. 1.

Таблица 1

Соотношения стоимостей сооружения кабельных линий
с кабелями с различной изоляцией

The ratio of the costs of construction of cable lines
using cables with various insulations

Номинальное напряжение линии, кВ	α_1	α_2	$\frac{K_{к.л}^п}{K_{к.л}}$
6–10	2,08	1,2	1,10
		1,5	1,24
		2,0	1,48
20	2,67	1,2	1,07
		1,5	1,19
		2,0	1,37
35	1,74	1,2	1,11
		1,5	1,29
		2,0	1,57
110	3,33	1,2	1,06
		1,5	1,15
		2,0	1,30
Примечание. $K_{к.л}$, $K_{к.л}^п$ – стоимость сооружения кабельной линии с кабелем с бумажно-масляной изоляцией и с изоляцией из сшитого полиэтилена.			

Как видно из данных табл. 1, увеличение стоимости кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению со стоимостью кабеля с бумажно-масляной изоляцией в 1,2...2 раза приведет к увеличению стоимости сооружения линии с кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена в 1,1...1,48; 1,07...1,37; 1,11...1,57; 1,06...1,3 раза соответственно для линий напряжением 6–10; 20; 35; 110 кВ.

При сопоставлении капитальных затрат на сооружение кабельной линии с одножильными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена с трехжильными кабелями с бумажно-масляной изоляцией необходимо иметь в виду снижение затрат на прокладку кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена за счет:

- меньшей массы барабанов с кабелем, вывозимых на трассу;
- необходимости монтажа меньшего количества соединительных муфт из-за больших строительных длин кабеля;

- меньшего диаметра каждого из одножильных кабелей по сравнению с трехжильным кабелем с бумажной изоляцией;
- меньшего допустимого радиуса изгиба по сравнению с трехжильными кабелями с алюминиевой оболочкой;
- отсутствия необходимости прогрева кабеля при монтаже в условиях отрицательных температур.

Масса барабанов кабелей для сооружения 1 км линии определена нами по данным [5–7].

Массы барабанов с трехжильным с бумажно-масляной изоляцией $G_{б.к}$ и одножильным с изоляцией из сшитого полиэтилена $G_{б.к}^п$ кабелями для сооружения линии протяженностью 1 км будут равны:

$$\begin{aligned} G_{б.к} &= G_{1бар} m_{бар} + q_{уд}; \\ G_{б.к}^п &= G_{1бар} m_{бар}^п + 3,01 q_{уд(1)}^п, \end{aligned} \quad (4)$$

где $G_{1бар}$ – масса барабана без кабеля, для деревянных барабанов № 20, 22, 26 равна соответственно 800, 1020, 1700 кг [8]; $m_{бар}$, $m_{бар}^п$ – количество барабанов для размещения трехжильного и одножильного кабелей, $m_{бар} = \frac{1000}{\ell_k}$, $m_{бар}^п = \frac{3000}{\ell_{к(1)}}$; $q_{уд}$, $q_{уд(1)}^п$ – удельная масса трехжильного и одножильного кабелей, кг/км; ℓ_k , $\ell_{к(1)}$ – длина трехжильного и одножильного кабелей, умещаемых на барабане.

Нами установлено, что масса барабанов с трехжильным кабелем с алюминиевыми жилами, свинцовой оболочкой и бумажно-масляной изоляцией, пропитанной нестекающим составом, на напряжение 6 и 10 кВ больше массы барабанов с трехжильным кабелем на те же напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена примерно в 1,3 раза.

Масса барабанов с трехжильным кабелем с бумажно-масляной изоляцией с алюминиевыми жилами и алюминиевыми оболочками на напряжения 6 и 10 кВ меньше, а со свинцовой оболочкой больше массы барабанов с трехжильным кабелем с алюминиевыми жилами и изоляцией из сшитого полиэтилена примерно в 1,12 раза.

Масса барабанов с одножильным кабелем с алюминиевыми жилами с изоляцией из сшитого полиэтилена меньше массы трехжильного кабеля с пропитанной и не пропитанной нестекающим составом изоляцией на напряжения 6 и 10 кВ с алюминиевыми жилами на те же напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена в 1,3 раза.

Масса барабанов с одножильным маслонаполненным кабелем с медными жилами и бумажной изоляцией на напряжение 110 кВ больше массы барабанов с кабелем с медными жилами с изоляцией из сшитого полиэтилена, необходимой для сооружения одного километра линии, в 1,4 раза (медные жилы) и 1,6 раза (алюминиевые жилы).

Стоимость сооружения кабельной линии можно представить как

$$K_{к.л} = K_к + K_п = K_к \left(1 + \frac{K_п}{K_к} \right) = K_к (1 + \alpha_3), \quad (5)$$

где $\alpha_3 = \frac{K_п}{K_к} \geq 1$ – коэффициент, указывающий, во сколько раз стоимость

прокладки кабеля превышает стоимость самого кабеля, значение α_3 , по данным ПО «Энергокомплект», равно 1,0 (для линий с кабелями с бумажно-масляной изоляцией) и 2,0 (для линий с кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена).

При принятых условиях стоимость сооружения кабельных линий с кабелями с различной изоляцией будет одинаковой, если $K_к^п = \frac{2}{3} K_к$, т. е. если стоимость кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена будет меньше стоимости кабеля с традиционной изоляцией (такое соотношение может иметь место при рассмотрении применения кабелей с алюминиевыми жилами с бумажной изоляцией, пропитанной нестекающим составом с церезином, и кабелей с алюминиевыми жилами с изоляцией из сшитого полиэтилена с наружной полиэтиленовой оболочкой с ленточной стальной броней или без нее).

В других рассматриваемых ситуациях $K_к^п = (1,2; 1,5; 2)K_к$ и тогда

$$\frac{K_{к.л}^п}{K_{к.л}} = \frac{K_к^п(1+2)}{K_к(1+1)} = \frac{1,5(1,2...2,0)K_к}{K_к} = 1,8 (2,25; 3),$$

т. е. стоимость сооружения кабельной линии с кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена превышает стоимость сооружения кабельной линии с кабелем с бумажной пропитанной изоляцией в 1,8...3 раза.

При оценке стоимости кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена необходимо учитывать факт увеличения пропускной способности кабелей за счет роста допустимой температуры нагрева жил.

Соотношения длительных допустимых токов нагрузки для трехжильных кабелей с алюминиевыми и медными жилами с бумажно-масляной изоляцией и трехжильных и одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 6; 10; 20; 35; 110 кВ при прокладке в земле приведены, в соответствии с данными [5–7] в табл. 2, 3.

Увеличение длительного допустимого тока соответствует как бы росту необходимой площади поперечного сечения жил кабеля δF , т. е.

$$\delta F = \frac{1}{j_n} (I_d^п - I_d), \quad (6)$$

где j_n – нормируемая плотность тока, для кабелей с бумажной изоляцией с алюминиевыми (числитель) или медными (знаменатель) жилами равна 1,6/3,0; 1,4/2,5; 1,2/2,0 А/мм² (при использовании максимальной нагрузки до

3000 ч; 3000–5000 ч и более 5000 ч) [5]; I_d^n , I_d – длительно допустимый ток на кабели с полиэтиленовой и бумажной изоляцией.

Таблица 2

Соотношение допустимых длительных токов нагрузки для трехжильных и одножильных кабелей с алюминиевыми жилами с бумажной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена при прокладке в земле

The ratio of the permissible continuous load currents for three-core cables and solid wires with aluminium cores with paper insulation and XLPE insulation for burying a cable

Площадь поперечного сечения жил, мм ²	Длительно допустимый ток, А, при напряжении						Увеличение площади поперечного сечения, мм ² , при напряжении					
	10 кВ, по данным		20 и 35 кВ, по данным		110 кВ, по данным		10 кВ для числа жил		20 и 35 кВ для числа жил		110 кВ для числа жил	
	[5]	[6]	[5]	[6]	[7]	[6]	3	1	3	1	1	
50	140	$\frac{156}{170}$	125	$\frac{161}{175}$	–	–	11,4	21,4	25,7	35,7	–	
70	165	$\frac{193}{210}$	155	$\frac{199}{215}$	–	–	20,0	32,1	31,4	42,8	–	
95	205	$\frac{233}{253}$	185	$\frac{233}{253}$	–	–	20,0	34,3	34,3	48,6	–	
120	240	$\frac{265}{288}$	210	$\frac{265}{288}$	–	–	17,8	34,3	39,2	55,7	–	
150	275	$\frac{300}{322}$	240	$\frac{300}{322}$	320	360	17,8	33,6	42,8	58,7	28,5	
185	310	$\frac{338}{364}$	275	$\frac{339}{365}$	354	396	20,0	18,6	45,7	64,2	30,0	
240	355	$\frac{392}{422}$	–	–	390	455	26,4	21,4	–	–	46,4	
400	–	–	–	–	470	587	–	–	–	–	77,8	
500	–	–	–	–	510	654	–	–	–	–	102,8	
630	–	–	–	–	542	719	–	–	–	–	126,4	

Примечания: 1. Числитель – для трехжильных, знаменатель – для одножильных кабелей с алюминиевыми жилами с изоляцией из сшитого полиэтилена.

2. На напряжении 110 кВ рассматриваются одножильные маслонаполненные кабели низкого давления с алюминиевыми жилами с бумажной изоляцией и одножильные кабели, которые расположены по треугольнику, а экраны кабелей соединены между собой и заземлены с двух сторон.

Из данных табл. 2 (когда кабели с алюминиевыми жилами прокладываются в земляных траншеях) и формулы (6) (при $j_n = 1,4$ А/мм²) следует, что увеличение площади поперечного сечения δF составляет:

– трехжильные кабельные линии напряжением 10 кВ:

$(0,21–0,28)F$ – при $F = 50–95$ мм²; $(0,11–0,15)F$ – при $F = 120–240$ мм²,

где F – площадь поперечного сечения жил кабеля;

Таблица 3

Соотношение допустимых длительных токов нагрузки для трехжильных и одножильных кабелей с медными жилами с бумажной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена при прокладке в земле
The ratio of the permissible continuous load currents for three-core cables and solid wires with copper conductor with paper insulation and XLPE insulation for burying a cable

Площадь поперечного сечения жил, мм ²	Длительно допустимый ток, А, при напряжении								Увеличение площади поперечного сечения, мм ² , при напряжении							
	10 кВ, по дан-ным		20 кВ, по дан-ным		35 кВ, по дан-ным		110 кВ, по дан-ным		10 кВ		20 кВ		35 кВ		110 кВ	
									для числа жил		для числа жил		для числа жил		для числа жил	
	[5]	[6]	[5]	[6]	[5]	[6]	[7]	[6]	3	1	3	1	3	1	1	1
70	215	$\frac{253}{275}$	200	$\frac{248}{275}$	–	–	–	–	15,2	24,0	19,2	30,0	–	–	–	–
95	265	$\frac{300}{326}$	240	$\frac{300}{326}$	–	–	–	–	14,0	24,4	24,0	34,4	–	–	–	–
120	310	$\frac{340}{370}$	275	$\frac{341}{370}$	270	$\frac{341}{370}$	–	–	12,0	24,0	26,4	38,0	28,4	40,0	–	–
150	355	$\frac{384}{413}$	315	$\frac{384}{413}$	310	$\frac{384}{413}$	320	440	11,6	23,2	27,6	39,2	29,6	41,23	48,0	–
185	400	$\frac{433}{466}$	355	$\frac{433}{466}$	–	$\frac{433}{466}$	354	480	13,2	26,4	31,2	44,4	–	–	50,4	–
240	460	$\frac{500}{537}$	–	$\frac{500}{537}$	–	–	390	537	16,0	30,8	–	–	–	–	58,8	–
300	–	–	–	–	–	–	430	581	–	–	–	–	–	–	60,4	–
400	–	–	–	–	–	–	478	644	–	–	–	–	–	–	66,4	–
500	–	–	–	–	–	–	510	693	–	–	–	–	–	–	73,2	–
630	–	–	–	–	–	–	542	737	–	–	–	–	–	–	78,0	–

Примечания: 1. Числитель – для трехжильных, знаменатель – для одножильных кабелей с медными жилами с изоляцией из сшитого полиэтилена.
2. На напряжении 110 кВ рассматриваются одножильные маслонаполненные кабели низкого давления, которые расположены по треугольнику и имеют соединенные между собой и заземленные с двух сторон экраны.

– трехжильные кабельные линии напряжением 10 кВ с бумажной изоляцией и одножильные кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена:

$$(0,36–0,45)F \text{ – при } F = 50–95 \text{ мм}^2; (0,1–0,28)F \text{ – при } F = 120–240 \text{ мм}^2;$$

– трехжильные кабельные линии напряжением 20–35 кВ:

$$(0,36–0,45)F \text{ – при } F = 50–95 \text{ мм}^2; (0,25–0,32)F \text{ – при } F = 120–240 \text{ мм}^2;$$

– трехжильные кабельные линии напряжением 20 и 35 кВ с бумажной изоляцией и одножильные кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена:

$(0,51-0,7)F$ – при $F = 50-95 \text{ мм}^2$; $(0,35-0,46)F$ – при $F = 120-185 \text{ мм}^2$;

– одножильные маслонаполненные кабели напряжением 110 кВ с бумажной изоляцией и одножильные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена:

$(0,19)F$ – при $F = 150-630 \text{ мм}^2$.

Из данных табл. 3 (когда кабели с медными жилами прокладываются в земляных траншеях) и формулы (6) (при $j_n = 2,5 \text{ А/мм}^2$) следует, что увеличение площади поперечного сечения δF составляет:

– трехжильные кабельные линии напряжением 10 кВ с бумажной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена:

$(0,15-0,2)F$ – при $F = 70-95 \text{ мм}^2$; $(0,07-0,1)F$ – при $F = 120-240 \text{ мм}^2$;

– трехжильные кабельные линии напряжением 10 кВ с бумажной изоляцией и одножильные кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена:

$(0,26-0,34)F$ – при $F = 70-95 \text{ мм}^2$; $(0,13-0,2)F$ – при $F = 120-240 \text{ мм}^2$;

– трехжильные кабельные линии напряжением 20 кВ:

$(0,25-0,26)F$ – при $F = 70-95 \text{ мм}^2$; $(0,17-0,22)F$ – при $F = 120-185 \text{ мм}^2$;

– трехжильные кабельные линии напряжением 20 кВ с бумажной изоляцией и одножильные кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена:

$(0,36-0,42)F$ – при $F = 70-95 \text{ мм}^2$; $(0,24-0,31)F$ – при $F = 120-185 \text{ мм}^2$;

– трехжильные кабельные линии напряжением 35 кВ:

$(0,2-0,23)F$ – при $F = 120-150$;

– трехжильные кабельные линии с бумажной изоляцией и одножильные кабельные линии с кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена напряжением 35 кВ:

$(0,27-0,33)F$ – при $F = 120-150 \text{ мм}^2$;

– одножильные маслонаполненные кабели низкого давления с бумажной изоляцией и одножильные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена:

$(0,27-0,32)F$ – при $F = 150-185 \text{ мм}^2$; $(0,12-0,24)F$ при $F = 240-630 \text{ мм}^2$.

Значения доли увеличения площади поперечного сечения рассматриваемых кабелей с традиционной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена содержатся в табл. 4.

Стоимость единицы длины кабеля K_k , руб./м, состоит из стоимости изоляции $K_{из}$ и стоимости токоведущих жил $K_{ж}$

$$K_k = K_{из} + K_{ж} = K_{из} + F\gamma c_{ж} \cdot 10^{-6} = G_{из} c_{из} + G_{ж} c_{ж}, \quad (7)$$

где γ – удельный объемный вес или плотность материала жилы (для меди равен 8890 кг/м³, для алюминия – 2703 кг/м³); $c_{ж}$ – стоимость единицы массы жилы, 3,7 и 10,2 руб./кг – соответственно алюминиевой и медной жил; $G_{из}$ – масса изоляции одного метра длины кабеля, кг; $c_{из}$ – стоимость одного килограмма изоляции, руб./кг (в среднем можно принять 397 руб./кг); $G_{ж} = F\gamma \cdot 10^{-6}$ – масса одного метра жилы, кг/м.

Таблица 4

Расчетные значения доли увеличения площади поперечного сечения жил кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена
Calculated values of the percentage of increase in cross-sectional area for the cores with XLPE insulation

Рассматриваемое соотношение между кабельными линиями	Номинальное напряжение, кВ	Доля увеличения площади поперечного сечения жил кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена при площади поперечного сечения жил, мм ²									
		70	95	120	150	185	240	300	400	500	630
Трехжильные кабельные линии с бумажной изоляцией и изоляцией из сшитого полиэтилена	10	0,21 0,28	0,15 0,21	0,10 0,15	0,08 0,12	0,07 0,10	0,07 0,11	–	–	–	–
	20	0,27 0,45	0,25 0,36	0,22 0,32	0,18 0,28	0,17 0,25	–	–	–	–	–
	35	–	–	0,24 0,32	0,2 0,28	–	–	–	–	–	–
Трехжильные кабельные линии с бумажной изоляцией и одножильные кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена	10	0,43 0,45	0,25 0,36	0,2 0,28	0,15 0,22	0,14 0,12	0,13 0,09	–	–	–	–
	20	0,42 0,61	0,36 0,51	0,31 0,46	0,26 0,39	0,24 0,34	–	–	–	–	–
	35	–	–	0,33 0,46	0,27 0,39	–	–	–	–	–	–
Одножильные маслонаполненные кабельные линии низкого давления и одножильные кабельные линии с кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена	110	–	–	–	0,32 0,19	0,27 0,16	0,24 0,19	0,2 0,19	0,17 0,19	0,15 0,20	0,12 0,20
Примечание. Числитель – медные жилы; знаменатель – алюминиевые жилы.											

Расчеты по формулам (7) и (8) приведены в табл. 5.

Стоимость единицы длины кабеля с полиэтиленовой изоляцией

$$K_k^n = K_{из}^n + F(1 - \sigma)\gamma c \cdot 10^{-6}, \quad (8)$$

где σ – коэффициент, меньший единицы, учитывающий повышение пропускной способности кабелей с полиэтиленовой изоляцией за счет повышения допустимой температуры нагрева жил (табл. 4).

Таблица 5

**Стоимость производства единицы длины кабеля (1 м)
с изоляцией из сшитого полиэтилена**

**The cost of production per a unit
of XLPE-insulated cable length (1 m)**

Номинальное напряжение кабеля, кВ	Масса полиэтилена, кг	Площадь поперечного сечения жилы, мм ²	Стоимость изоляции, руб.	Масса жилы, кг		Стоимость 1 м жилы, руб.		Стоимость 1 м кабеля с жилами, руб.		Стоимость 1 м кабеля дан- ной пропускной способности с жилами, руб.	
				алюми- ниевой	медной	алюми- ниевой	медной	алюми- ниевой	медной	алюми- ниевой	медной
6	0,1623	70	0,6456	0,1836	0,6046	0,7130	6,2391	1,3586	6,8847	1,158	6,030
6	0,2359	185	0,9486	0,4878	1,6192	1,8509	16,6535	2,7995	17,6021	2,611	16,500
6	0,2731	240	1,0962	0,6329	2,0971	2,3955	21,5582	3,4917	22,6544	3,228	21,330
10	0,2070	70	0,7929	0,1836	0,6046	0,7130	6,2391	1,5050	7,0320	1,306	6,188
10	0,2954	185	1,1484	0,4878	1,6192	1,8509	16,6535	2,9993	17,8019	2,814	16,750
10	0,3307	240	1,2870	0,6329	2,0971	2,3955	21,5582	3,6825	22,8452	3,419	21,510
20	0,332	70	1,2354	0,1836	0,6046	0,7130	6,2391	1,9484	7,4745	1,646	5,040
20	0,4564	185	1,7244	0,4878	1,6192	1,8509	16,6535	3,5753	18,3775	3,112	13,460
20	0,5061	240	1,9157	0,6329	2,0971	2,3955	21,5582	4,3112	23,1548	–	–
35	0,5578	70	1,9992	0,1836	0,6046	0,7130	6,2391	2,7122	8,2383	–	7,080
35	0,7346	185	2,6491	0,4878	1,6192	1,8509	16,6535	4,5000	19,3026	3,982	18,970
35	0,8054	240	2,9110	0,6329	2,0971	2,3955	21,5582	5,3065	24,1501	–	–
110	1,9444	150	9,0479	0,3890	1,6192	9,0470	16,6520	18,0945	25,6999	16,370	20,060
110	1,9703	240	9,2600	0,6320	2,0970	9,2380	21,5580	18,4980	30,8180	16,740	29,060
110	2,0798	400	9,9196	1,0277	3,3830	9,7950	34,7607	19,7146	44,6803	17,850	39,290
110	2,2380	500	9,7957	1,3440	4,4593	10,5335	46,0394	20,3292	55,8351	18,220	46,520
110	2,4364	630	11,6762	1,6868	5,6861	11,6760	58,6451	23,3524	70,3213	21,020	57,940
Примечание. Стоимость 1 м кабеля с бумажной изоляцией типа ААБ сечением жил 185 и 240 мм ² на торгах в 2017 г. была равна 19,0 и 28,0 руб., а типа ЦАСБ – 26,2 и 35,8 руб.											

Стоимость материала алюминиевой жилы превышает стоимость полиэтиленовой изоляции кабеля в 1,1...2,18 раза (кабели на напряжение 6 кВ, площадь поперечного сечения алюминиевых жил 70...240 мм²); в 1,61...1,86 раза (кабели на напряжение 10 кВ, площадь поперечного сечения алюминиевых жил 185...240 мм²); в 1,07...1,25 раза (кабели на напряжение 20 кВ, площадь поперечного сечения алюминиевых жил 185...240 мм²).

При площади поперечного сечения алюминиевых жил 70 мм^2 и номинальном напряжении кабеля 10; 20; 35 кВ стоимость материала жил меньше стоимости изоляции из сшитого полиэтилена.

Стоимость материала алюминиевой жилы сечением $150\text{--}630 \text{ мм}^2$ у кабелей напряжением 110 кВ примерно равна стоимости изоляции из сшитого полиэтилена.

Из данных табл. 5 видно, что стоимость материала медной жилы рассматриваемых сечений превышает стоимость полиэтиленовой изоляции кабеля в:

- 9,66...19,66 раза (кабели на напряжение 6 кВ);
- 7,86...16,75 раза (кабели на напряжение 10 кВ);
- 5,05...11,25 раза (кабели на напряжение 20 кВ);
- 3,12...7,4 раза (кабели на напряжение 35 кВ);
- 1,84...5,1 раза (кабели на напряжение 110 кВ).

Значение $K_{\text{к}}^{\text{п}}$ будет равно или меньше $K_{\text{к}}$, если соблюдается условие

$$K_{\text{из}}^{\text{п}} + F(1 - \sigma)\gamma_{\text{с}} \cdot 10^{-6} \leq K_{\text{из}} + F\gamma_{\text{с}} \cdot 10^{-6}$$

или

$$K_{\text{из}}^{\text{п}} - K_{\text{из}} \leq F\sigma\gamma_{\text{с}} \cdot 10^{-6}; \quad K_{\text{из}}(a_1 - 1) \leq F\sigma\gamma_{\text{с}} \cdot 10^{-6}, \quad (9)$$

где $a_1 > 1$ – коэффициент, учитывающий увеличение стоимости изоляции из сшитого полиэтилена по сравнению со стоимостью бумажной изоляции.

Из (9) следует, что коэффициент a_1 не должен превышать значение

$$a_1 \leq 1 + \frac{F\sigma\gamma_{\text{с}} \cdot 10^{-6}}{K_{\text{из}}}. \quad (10)$$

Отношение стоимости материала и изготовления жил к стоимости материала и изготовления изоляции кабеля из сшитого полиэтилена может лежать в широких пределах (значительно превышает единицу при медных жилах кабеля; быть большим или меньшим единицы – при алюминиевых жилах кабеля).

Следовательно, для обеспечения одинаковой стоимости кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена с кабелями с бумажной изоляцией необходимо, чтобы стоимость изоляции из сшитого полиэтилена не превышала стоимость бумажной изоляции в 1,45; 1,7 и 1,64 раза соответственно для кабелей на напряжение 10; 20–35 и 110 кВ. При отмеченных значениях a_1 можно ожидать, что приведенные затраты на сооружение кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена будут меньше таких же затрат для сооружения кабельных линий с бумажно-масляной изоляцией.

Оценка значения годовых эксплуатационных расходов

По кабельным линиям с кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению с кабельными линиями с бумажно-масляной изоляцией сокращаются расходы на эксплуатацию за счет отсутствия необходимости в:

- составлении карты почвенных коррозионных зон;
- покрытии антикоррозионными лаками и красками неоцинкованной стальной брони кабелей, проложенных в кабельных сооружениях;
- периодической замене вертикальных участков кабельных линий из-за осушения изоляции;
- контроле за давлением и отборе проб масла из маслонаполненных кабельных каналов и муфт для определения характеристик масла и наличия в нем нерастворенного воздуха; ежемесячных осмотров подпитывающих пунктов (для маслонаполненных кабельных линий напряжением 110 кВ).

В результате затраты на техническое обслуживание кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена могут быть уменьшены по сравнению с соответствующими затратами на обслуживание кабельных линий с бумажно-масляной изоляцией на:

- 9 % – для кабельных линий напряжением до 35 кВ;
- 17 % – для кабельных линий напряжением до 110 кВ.

Затраты на выполнение плановых и аварийных ремонтных работ на кабельных линиях электропередачи напряжением до 35 кВ с кабелями с полиэтиленовой изоляцией меньше на 15–18 %, чем на таких же линиях с бумажно-масляной изоляцией; при этом стоимость одного аварийного ремонта как зависит, так и не зависит от материала изоляции кабеля, а удельная повреждаемость кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на порядок меньше повреждаемости кабелей с бумажно-масляной изоляцией.

В целом отношение расходов на техническое обслуживание и ремонт кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена к соответствующим расходам по кабельным линиям с бумажно-масляной изоляцией равны 0,9 и 0,83 соответственно для линий напряжением до 35 и 110 кВ.

Следовательно, расходы на техническое обслуживание и ремонт кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению с аналогичными расходами по линиям с кабелями с бумажно-масляной изоляцией меньше примерно на 10 % (линии напряжением до 35 кВ) и на 17 % (линии напряжением 110 кВ).

Если бы стоимость сооружения кабельной линии с кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена была равна стоимости сооружения кабельной линии с бумажно-масляной изоляцией, то приведенные затраты на сооружение и эксплуатацию кабельной линии с изоляцией из сшитого полиэтилена были бы меньше соответствующих затрат по кабельной линии с традиционной изоляцией.

Торги, проведенные на Белорусской торговой бирже в декабре 2016 г. – марте 2017 г., показали, что стоимость 1 м кабеля типов ААБ, ЦАСБ, ААШв напряжением 10 кВ с алюминиевыми жилами превышает стоимость одного метра кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена одной и той же площади поперечного сечения не только с алюминиевыми, но и с медными жилами (табл. 5). Это обеспечивает меньшее значение капитальных и при-

веденных затрат на сооружение и эксплуатацию кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена и, следовательно, указывает на безусловную эффективность их применения.

ВЫВОДЫ

1. Оценка целесообразности применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена по сравнению с кабелями на те же напряжения с бумажно-масляной изоляцией выполнена на основе критерия приведенных затрат. При этом сравнивались между собой кабели различных конструктивных исполнений и материала изоляции: трехжильные с бумажной изоляцией и трехжильные с изоляцией из сшитого полиэтилена; трехжильные с бумажной изоляцией и одножильные с изоляцией из сшитого полиэтилена; одножильные маслонаполненные кабели напряжением 110 кВ с бумажной изоляцией и одножильные кабели напряжением 110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена.

2. Так как стоимость сооружения кабельной линии состоит из стоимости кабеля и стоимости его прокладки, то увеличение стоимости силового электрического кабеля в $n = 1,2$ (1,5; 2) раза по сравнению со стоимостью традиционного кабеля приводит к увеличению стоимости сооружения кабельной линии электропередачи в 1,06–1,1 раза (при $n = 1,2$) и в 1,3–1,5 раза (при $n = 2$).

3. Увеличение длительно допустимого тока нагрузки на кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена из-за большей допустимой температуры его нагрева по сравнению с кабелями с бумажно-масляной изоляцией соответствует как бы увеличению площади поперечного сечения жил кабеля (в размере до 0,61 от первоначальной) и, следовательно, обеспечивает снижение стоимости кабеля за счет снижения стоимости изготовления токопроводящих жил.

4. Приведенные затраты на сооружение и эксплуатацию кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена (при превышении стоимости кабеля в 1,2 и 2 раза по сравнению со стоимостью кабеля с традиционной изоляцией), несмотря на снижение затрат на изготовление токопроводящих жил и сниженные годовые эксплуатационные расходы (на 9 и 17 % соответственно кабельные линии напряжением до 35 и 110 кВ) оказываются больше приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию кабельных линий с бумажной изоляцией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гук, Ю. Б. Анализ надежности электротехнических установок / Ю. Б. Гук. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. 224 с.
2. Короткевич, М. А. Эксплуатация электрических сетей / М. А. Короткевич. Минск: Вышэйш. шк., 2014. 350 с.
3. Козлов, В. А. Электроснабжение городов / В. А. Козлов. Л.: Энергия, 1977. 280 с.

4. Майоров, А. В. К обоснованию и выбору параметров кабельных линий 20 кВ в мегаполисе / А. В. Майоров, А. В. Шунтов // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 66: Актуальные проблемы надежности систем энергетики. Минск: Бел. нац. техн. ун-т, 2015. С. 125–132.
5. Правила устройства электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 1987. 646 с.
6. Кабели и провода. Каталог продукции. Витебск: Производственное объединение «Энергокомплект», 2015. 58 с.
7. Кабели маслонаполненные на переменное напряжение 110–500 кВ. Технические условия: ГОСТ 16441–78. М.: Изд-во стандартов, 1978. 39 с.
8. Пантелеев, Е. Г. Монтаж и ремонт кабельных линий: справ. электромонтажника / Е. Г. Пантелеев. М.: Энергоатомиздат, 1990. 228 с.

Поступила 28.03.2017 Подписана в печать 02.06.2017 Опубликована онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Guk Yu. B. (1988) *Reliability Analysis of Electrical Installations*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., Leningrad Branch. 224 (in Russian).
2. Korotkevich M. A. (2014) *Operation of Electric Networks*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 350 (in Russian).
3. Kozlov V. A. (1977) *The Power Supply of Cities*. Leningrad, Energiya Publ. 280 (in Russian).
4. Maiorov A. V., Shuntov A. V. (2015) Towards the Justification and Selection of Parameters of 20 kV Cable Lines in a Megapolis. *Methodical Problems of Research of Reliability of Large Energy Systems. Issue 66: Topical Problems of Reliability of Energy Systems*. Minsk, BNTU, 125–132 (in Russian).
5. *Rules for Eleecrical Units Installation* (1987). Moscow, Energoatomizdat Publ. 646 (in Russian).
6. *The Cables and Wires. The Product Catalog* (2015). Vitebsk, “Energocomplekt” Production Association. 58 (in Russian).
7. GOST 16441-78. Oil-Filled Cables for Alternating Voltage 110–500 kV. Specifications. Moscow, Standards Publishing House, 1978. 39 (in Russian).
8. Panteleev E. G. (1990) *Installation and Repair of Cable Lines: the Handbook for a Construction Electrician*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 228 (in Russian).

Received: 28 March 2017

Accepted: 2 June 2017

Published online: 29 September 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-433-445

УДК 621.311

Исследование режимов автономного синхронного генератора

В. С. Сафарян¹⁾

¹⁾ЗАО «Научно-исследовательский институт энергетики» (Ереван, Республика Армения)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Значение проблемы статической устойчивости стационарного режима энергосистемы для ее функционирования исключительно велико. Исследованию статической устойчивости энергосистемы посвящен ряд работ, однако вопросам статической устойчивости стационарных точек автономного синхронного генератора уделено недостаточно внимания. В статье рассмотрены переходные и резонансные (стационарные) режимы такого генератора при активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузках. Приведены математические модели переходных процессов в натуральной форме и в системе координат d, q . Установлено, что математическая модель переходного процесса автономного синхронного генератора идентична математической модели переходного процесса синхронной машины при трехфазном коротком замыкании. Электромагнитные переходные процессы автономного синхронного генератора описываются системой линейных автономных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, однако схема замещения генератора содержит зависимые источники. Исследована устойчивость стационарного движения автономного синхронного генератора при заданной угловой скорости вращения ротора. Получено условие существования и устойчивости стационарной точки автономного синхронного генератора. Условие существования стационарной точки такого генератора не зависит от активного сопротивления нагрузки и статорной обмотки, а также от индуктивности ротора. Определение стационарных точек генератора сводится к отысканию корней полинома четвертой степени. Построены графики зависимостей электромагнитного момента от угловой скорости вращения ротора (механическая характеристика). Приведены схемы замещения, соответствующие уравнениям переходного процесса автономного синхронного генератора.

Ключевые слова: автономный синхронный генератор, переходный процесс, стационарный режим, статическая устойчивость, внешние воздействия, обобщенный вектор, самовозбуждение, математическая модель

Для цитирования: Сафарян, В. С. Исследование режимов автономного синхронного генератора / В. С. Сафарян // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 5. С. 433–445. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-433-445

Адрес для переписки

Сафарян Виталий Сафарович
ЗАО «Научно-исследовательский институт
энергетики»
просп. Мясникяна, 5/1,
0025, г. Ереван, Республика Армения
Тел.: +374 010 559-659
liliasafar@rambler.ru

Address for correspondence

Safaryan Vitali S.
CJSC “Scientific Research Institute
of Energy”
5/1 Myasnikyan Ave.,
0025, Yerevan, Republic of Armenia
Tel.: +374 010 559-659
liliasafar@rambler.ru

The Study of the Autonomous Synchronous Generator Modes

V. S. Safaryan¹⁾

¹⁾CJSC “Scientific Research Institute of Energy” (Yerevan, Republic of Armenia)

Abstract. The importance of the problem of the static stability of the stationary mode of the power system for its operation is extremely high. The investigation of the static stability of the power system is a subject of a number of works, but the problems of static stability of the stationary points of an autonomous synchronous generator are given little attention. The article considers transient and resonant (stationary) modes of the generator under active-inductive and active-capacitive loads. Mathematical model of transients in a natural form and in the coordinate system d, q are plotted. It is discovered that the mathematical model of the transition process of an autonomous synchronous generator is identical to the mathematical model of the transition process of the synchronous machine under three-phase short circuit. Electromagnetic transients of an autonomous synchronous generator are described by a system of linear autonomous differential equations with constant coefficients. However, the equivalent circuit of a generator contains dependent sources. We investigated the stability of stationary motion of an autonomous synchronous generator at a given angular velocity of rotation of the rotor. The condition for the existence and stability of stationary points of an autonomous synchronous generator is derived. The condition for the existence of stationary points of such a generator does not depend on the active load resistance and stator windings, and inductance of the rotor. The determining of stationary points of the generator is reduced to finding roots of a polynomial of the fourth degree. The graphs of electromagnetic torque dependencies on the angular velocity of rotation of the rotor (mechanical characteristics) are plotted. The equivalent circuits, corresponding to the equations of the transition process of an autonomous synchronous generator, are featured as well.

Keywords: autonomous synchronous generator, transition process, steady-state mode, static stability, external influences, generalized vector, self-excitation, mathematical model

For citation: Safaryan V. S. (2017) The Study of the Autonomous Synchronous Generator Modes. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (5), 433–445. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-433-445 (in Russian)

Автономные электроэнергетические системы (ЭЭС) занимают важное место в стратегии развития энергетики. В последние годы они получили большое распространение в системе электроснабжения не только специального, но и общего назначения. Необходимость применения автономных ЭЭС возникает тогда, когда технически невозможно или экономически невыгодно использовать централизованное электроснабжение [1].

Самовозбуждение трактуется как явление параметрического резонанса в цепи статора синхронного генератора (СГ) [2, 3], при котором контуры статора рассматриваются как параметрическая цепь, поскольку параметры самоиндукции (для явнополосных машин) и взаимные индуктивности меняются с частотой вращения ротора. Вышеприведенная трактовка ошибочна по следующим соображениям:

а) математическая модель электромагнитного переходного процесса (ЭПП) синхронной машины (СМ) в координатах d, q представляется системой линейных обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами [2–7];

б) условием самовозбуждения, согласно [2, 3], является статическая устойчивость решения системы электромагнитного переходного процесса (СЭПП) СМ.

Следовательно, самовозбуждение – это нарушение статической устойчивости решения СЭПП СМ (процесс при заданной скорости вращения ротора).

Вопросы усовершенствования системы возбуждения синхронных и асинхронизированных генераторов автономных систем электроснабжения рассмотрены в [8]. Также там представлены разработки новых электрических схем и способов возбуждения синхронных и асинхронизированных генераторов автономных систем электроснабжения. Предложено в качестве устройств бесконтактной передачи мощности в генераторах использовать новую конструкцию кольцевого вращающегося трансформатора.

Значение проблемы статической устойчивости стационарного режима энергосистемы для ее функционирования исключительно велико. Исследованию статической устойчивости энергосистемы посвящен ряд работ [6–9], однако вопросам статической устойчивости стационарных точек автономного синхронного генератора (АСГ) уделено недостаточно внимания.

Движение СМ в натуральной форме выражается системой уравнений [1]:

$$\begin{cases} u_s = Ri_s + \frac{d\psi_s}{dt}, s = a, b, c; \\ e_r = ri_r + \frac{d\psi_r}{dt}; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_s + M_m, \end{cases} \quad (1)$$

где u_s – мгновенное значение напряжения статора; R, r – активное сопротивление статорной и роторной обмоток; i_s, i_r – ток в обмотках статора и ротора; e_r – электродвижущая сила обмотки возбуждения [2, 3, 6]; J – момент инерции вращающихся масс; ω – угловая скорость вращения ротора; M_s – электромагнитный момент; M_m – механический момент внешних сил на валу ротора.

Связь между потокосцеплением и током СМ записывается следующим образом [2, 3, 6]:

$$\begin{cases} \psi_a = Li_a + L_m i_r \cos \alpha; \\ \psi_b = Li_b + L_m i_r \cos(\alpha - \rho); \\ \psi_c = Li_c + L_m i_r \cos(\alpha + \rho); \\ \psi_r = li_r + L_m [i_a \cos \alpha + i_b \cos(\alpha - \rho) + i_c \cos(\alpha + \rho)], \end{cases} \quad (2)$$

где L, l – индуктивность рассеяния обмотки статора и ротора; L_m – взаимная индуктивность между обмотками фаз статора и ротора при их парал-

лельном расположении; $\rho = 120^\circ$; α – угол между неподвижной осью и осью обмотки ротора

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \int_0^t \omega(t) dt. \quad (3)$$

Представим (2) в матричной форме

$$\psi = Ai, \quad (4)$$

где

$$\psi = (\psi_a, \psi_b, \psi_c, \psi_r)^t;$$

$$i = (i_a, i_b, i_c, i_r)^t;$$

$$A = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 & L_m \cos \alpha \\ 0 & L & 0 & L_m \cos(\alpha - \rho) \\ 0 & 0 & L & L_m \cos(\alpha + \rho) \\ L_m \cos \alpha & L_m \cos(\alpha - \rho) & L_m \cos(\alpha + \rho) & l. \end{bmatrix}$$

Поскольку $\Delta = |A| = L^2(Ll - 1,5L_m^2) > 0$, то из (4) вектор тока i однозначно выражается через вектор потокоцепления ψ .

Электромагнитный момент M_ψ определяется по уравнению [6]

$$M_\psi = \frac{dW_\psi}{dt},$$

где W_ψ – накопленная в обмотках машины электромагнитная энергия

$$W_\psi = 0,5 \psi^t i = i^t A i = \psi^t A^{-1} \psi.$$

Используя последние два соотношения, для M_ψ получим

$$M_\psi = -L_m i_r [i_a \sin \alpha + i_b \sin(\alpha - \rho) + i_c \sin(\alpha + \rho)].$$

Характеристический многочлен матрицы A имеет вид

$$(L - \lambda)^2 [(L - \lambda)(l - \lambda) - 1,5L_m^2] = 0, \quad (5)$$

при этом у матрицы A есть четыре действительных положительных собственных числа, два из которых одинаковы. Следовательно, матрица A – положительно определенная [10].

Рассмотрим работу СГ на статическую симметричную нагрузку, состоящую из активного, индуктивного и емкостного элементов (рис. 1).

Если принять, что в индуктивности синхронной машины L и в активном сопротивлении статора R включены соответственно индуктивность нагруз-

ки L_n и ее активное сопротивление r_n (рис. 1а), то зажимы машины можно перенести непосредственно на зажимы конденсатора c_n (рис. 1б). Система дифференциальных уравнений переходного процесса АСГ в натуральной форме (без преобразования переменных) примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + L_m \frac{di_r}{dt} \cos \alpha - \omega L_m i_r \sin \alpha + \frac{1}{c_n} \int_0^t i_a dt = 0; \\ Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + L_m \frac{di_r}{dt} \cos(\alpha - \rho) - \omega L_m i_r \sin(\alpha - \rho) + \frac{1}{c_n} \int_0^t i_b dt = 0; \\ Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + L_m \frac{di_r}{dt} \cos(\alpha + \rho) - \omega L_m i_r \sin(\alpha + \rho) + \frac{1}{c_n} \int_0^t i_c dt = 0; \\ ri_r + l \frac{di_r}{dt} + L_m \left[\frac{di_a}{dt} \cos \alpha + \frac{di_b}{dt} \cos(\alpha - \rho) + \frac{di_c}{dt} \cos(\alpha + \rho) \right] - \\ - \omega L_m [i_a \sin \alpha + i_b \sin(\alpha - \rho) + i_c \sin(\alpha + \rho)] = e_r; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_s + M_m. \end{array} \right. \quad (6)$$

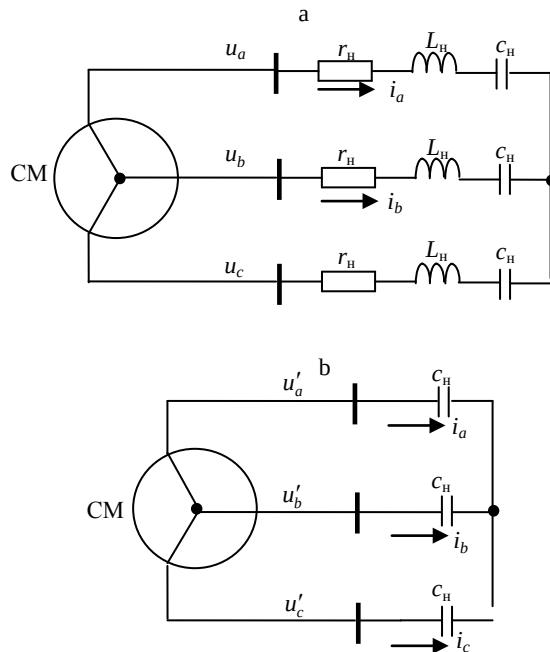


Рис. 1. Схема автономного синхронного генератора, работающего на статическую нагрузку:
а – исходная; б – после перенесения зажимов статора

Fig. 1. The scheme of an autonomous synchronous generator, operating at a static load:
a – initial scheme; b – after displacement of stator clamps

Представим (6) в системе координат d, q :

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di_d}{dt} = -Ri_d - \omega L i_q - L_m \frac{di_r}{dt} - u_d; \\ L \frac{di_q}{dt} = -Ri_q + \omega L i_d + \omega L_m i_r - u_q; \\ l \frac{di_r}{dt} = e_r - r i_r - 1,5 L_m \frac{di_d}{dt}; \\ J \frac{d\omega}{dt} = -1,5 L_m i_r i_q + M_m; \\ \frac{du_d}{dt} = \frac{1}{c_n} i_d - \omega u_q; \\ \frac{du_q}{dt} = \frac{1}{c_n} i_q + \omega u_d, \end{array} \right. \quad (7)$$

где i_d, i_q, u_d, u_q – компоненты обобщенного вектора тока и напряжения статора

$$\dot{I} = i_q + j i_d; \quad \dot{U} = u_q + j u_d.$$

Уравнение статорного контура в комплексной форме принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} (Lp + Z)\dot{I} = -j L_m i_r (p + j\omega) - \dot{U}; \\ (p + j\omega)\dot{U} = \dot{I} / c_n, \end{array} \right. \quad (8)$$

где $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования; $Z = R + j\omega L$.

Рассмотрим в отдельности случаи активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузок.

1. Активно-индуктивная нагрузка

При отсутствии емкости в составе нагрузки система уравнений (7), которая представляет режим трехфазного короткого замыкания синхронного генератора, примет следующий вид ($c_n \rightarrow \infty; u_d = u_q = 0$):

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di_d}{dt} = -Ri_d - \omega L i_q - L_m \frac{di_r}{dt}; \\ L \frac{di_q}{dt} = -Ri_q + \omega L i_d + \omega L_m i_r; \\ l \frac{di_r}{dt} = e_r - r i_r - 1,5 L_m \frac{di_d}{dt}; \\ J \frac{d\omega}{dt} = -1,5 L_m i_r i_q + M_m. \end{array} \right. \quad (9)$$

Из (9), приравнявая нулю производные, получаем стационарный режим АСГ:

$$\begin{cases} Ri_d - \omega Li_q = 0; \\ -Ri_q + \omega Li_d + \omega L_m i_r = 0; \\ ri_r = e_r; \\ 1,5L_m i_r i_q = M_m. \end{cases} \quad (10)$$

При заданной скорости движения ротора (ω считаем заданной) определение стационарной точки сводится к решению линейной системы: ток i_r определяем непосредственно ($i_r = e_r/r$), далее из первых двух уравнений находим i_q , i_d , а из последнего – M_m :

$$\begin{cases} i_d = \frac{\omega^2 L L_m}{\Delta} i_r; \\ i_q = \frac{R \omega L_m}{\Delta} i_r; \\ M_m = \frac{1,5 L_m^2 i_r^2 R \omega}{\Delta}, \end{cases}$$

где $\Delta = R^2 + \omega^2 L^2$.

Покажем, что ЭПП АСГ устойчив. При этом характеристическое уравнение имеет вид:

$$\begin{vmatrix} Lp + R & \omega L & pL_m \\ -\omega L & Lp + R & -\omega L_m \\ 1,5pL_m & 0 & pl + r \end{vmatrix} = 0. \quad (11)$$

Используя известное соотношение $Ll - 1,5L_m^2 > 0$, легко показать, что многочлен третьей степени (11) устойчив [10].

Исследуем условия существования стационарного режима АСГ. Из последних двух уравнений системы (10) i_r и i_q определяем непосредственно ($i_r = e_r/r$; $i_q = M_m/1,5L_m i_r$), далее из первых двух уравнений, исключая i_d , получаем

$$L^2 \omega^2 - \frac{R}{i_q} L_m i_r \omega + R^2 = 0. \quad (12)$$

Квадратное уравнение (12) не имеет отрицательных корней, а условие существования положительных корней сводится к следующему:

$$\frac{e_r^2}{M_m} \geq \frac{4Lr^2}{3L_m^2}. \quad (13)$$

В левой части (13) выступают внешние воздействия СГ, а в правой – конструктивные параметры СГ и нагрузки, при этом условие (13) не зависит от активного сопротивления статора и нагрузки, а также от индуктивности ротора. С изменением R при фиксированных внешних воздействиях режимные параметры стационарного режима i_d , i_q , i_r остаются неизменными, а ω изменяется по прямо пропорциональному закону. Квадратное уравнение (12) при условии (13) имеет два положительных корня, один из которых меньше $\omega_{кр}$ и является угловой скоростью вращения ротора в устойчивом стационарном режиме, а второй корень больше $\omega_{кр}$ и соответствует неустойчивому стационарному режиму.

Механическая характеристика $M_3 = M_3(\omega)$ представлена на рис. 2а, где $\omega_{кр} = \pm R/L$. Отметим, что у АСГ нет понятия скольжения, так как угловая скорость вращающегося магнитного поля статора равна угловой скорости вращения ротора. График функции $M_3 = M_3(\omega)$ симметричен относительно начала координат, а изменение знака ω означает лишь изменение направления вращения ротора. Максимальное значение электромагнитного момента $M_3 = 3L_m^2 i_r^2 / 4L$.

Механическая характеристика $M_3 = M_3(\omega)$ представлена на рис. 2б, где $\omega_{кр}$ является решением биквадратного уравнения, которое всегда имеет действительное решение

$$L^2 \omega^4 - \left(R^2 - 2 \frac{L}{c_n} \right) \omega^2 - \frac{3}{c_n^2} = 0.$$

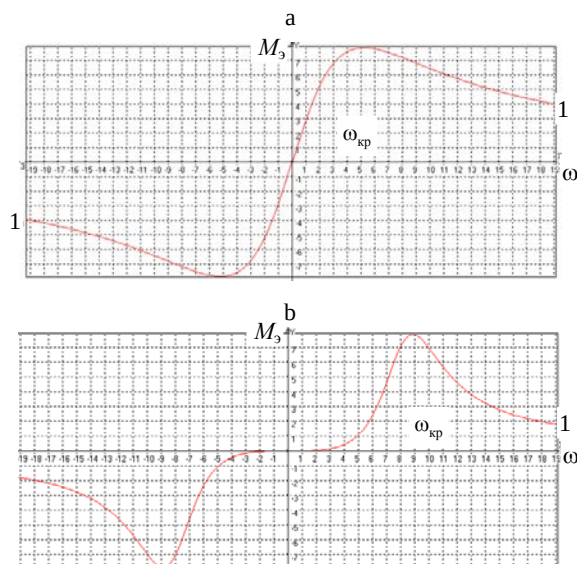


Рис. 2. Механические характеристики автономного синхронного генератора при нагрузке:
а – активно-индуктивной; б – активно-емкостной

Fig. 2. The mechanical characteristics an autonomous synchronous generator, operating at a load:
a – at an active-inductive load; b – at an active-conductive load

Функция $M_3(\omega)$ имеет точку перегиба при $\omega = 0$. Если корень уравнения $f(\omega) = 0$ меньше, чем $\omega_{кр}$ (рис. 2), то соответствующая стационарная точка устойчива. Существует также значение $c_H = c_H^{рез}$, при котором $\omega_{рез} = 1/\sqrt{Lc_H^{рез}}$ (явление резонанса), т. е. $\left(\omega L - \frac{1}{\omega c_H}\right) = 0$. Следовательно, $i_d = 0$; $i_q = \omega L_m i_r / R$; $i_q = 0$. Значение $c_H^{рез}$ определяется соотношением

$$c_H^{рез} = \left[\frac{L_m^2 e_r^2}{R r^2 M_m} \right]^2 \frac{1}{L}.$$

Можно показать, что $\omega_{рез} < \omega_{кр}$, т. е. резонансный стационарный режим устойчив.

2. Активно-емкостная нагрузка

Математическая модель стационарного режима получается из (7) путем приравнивания нулю производных переменных:

$$\left\{ \begin{array}{l} R i_d + \left(\omega L - \frac{1}{\omega c_H} \right) i_q = 0; \\ \left(\omega L - \frac{1}{\omega c_H} \right) i_d - R i_q = -\omega L_m i_r; \\ i_r = \frac{e_r}{r}; \\ i_q = \frac{M_m}{1,5 L_m i_r}; \\ u_q = \frac{1}{\omega c_H} i_d; \\ u_d = -\frac{1}{\omega c_H} i_q. \end{array} \right. \quad (14)$$

При заданной скорости движения ротора определение стационарной точки сводится к решению линейной системы (14): ток i_r определяем непосредственно, далее из первых двух уравнений находим i_d , i_q , затем M_3 , u_d , u_q :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_d = \frac{\omega L_m i_r (\omega L - 1/\omega c_H)}{\Delta} i_r; \\ i_q = \frac{R \omega L_m}{\Delta} i_r; \\ M_3 = \frac{1,5 L_m^2 i_r^2 R \omega}{\Delta}, \end{array} \right.$$

где $\Delta = R^2 + (\omega L - 1/\omega c_H)^2$.

Рассмотрим устойчивость решения СЭПП СМ, пренебрегая переходным процессом цепи ротора (возбуждение постоянным магнитом). Условием устойчивости решения (8) является

$$\begin{vmatrix} Lp + Z & -1 \\ 1/c_H & p + j\omega \end{vmatrix} = 0$$

или

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(p_1) = \frac{-R + \sqrt{R^2 - 4L/c_H}}{2L} < 0; \\ \operatorname{Re}(p_2) = \frac{-R - \sqrt{R^2 - 4L/c_H}}{2L} < 0; \\ I_m(p_1) = I_m(p_2) = -\omega. \end{cases} \quad (15)$$

Из (15) заключаем, что при пренебрежении переходным процессом в контуре ротора решение СЭПП устойчиво. Исследуем условие существования стационарного режима АСГ.

Из (14), исключая переменную i_d (i_r, i_q выражены через внешние воздействия e_r, M_m), получим полином четвертой степени относительно ω

$$f(\omega) = L^2 c_H^2 \omega^4 - \frac{R}{i_q} L_m i_r c_H^2 \omega^3 + (R^2 c_H^2 - 2L c_H) \omega^2 + 1 = 0. \quad (16)$$

Исследуем условие существования действительных положительных корней полинома (16). Перепишем его в следующем виде:

$$f_1(\omega) = f_2(\omega), \quad (17)$$

где $f_1(\omega) = a\omega^2 - b\omega + c$; $a = L^2 c_H^2 > 0$; $b = \frac{R}{i_q} L_m i_r c_H^2 > 0$; $c = (R^2 c_H^2 - 2L c_H)$;

$$f_2(\omega) = -\frac{1}{\omega^2}.$$

Взаимные расположения графиков функций $f_1(\omega)$, $f_2(\omega)$ изображены на рис. 3.

Абсцисса вершины параболы $f_1(\omega)$ положительна, $\omega_0 = b/2a$. Для случая рис. 3а дискриминант уравнения $f_1(\omega) = 0$ отрицателен и (17) не имеет действительных корней. Для остальных случаев дискриминант уравнения $f_1(\omega) = 0$ положителен, однако не всегда (17) имеет действительные корни. Предельным случаем является рис. 3с, где кривые касаются и (17) имеет два одинаковых корня.

Таким образом, необходимым, но недостаточным условием существования действительных корней уравнения (17) является $b^2 - 4ac > 0$.

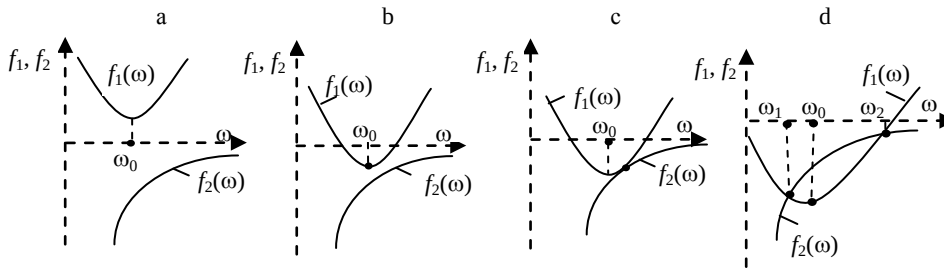


Рис. 3. Взаимное расположение графиков функций $f_1(\omega)$, $f_2(\omega)$

Fig. 3. Relative positions of the graphs of functions $f_1(\omega)$, $f_2(\omega)$

Исследуем поведение функции $f(\omega)$ (16)

$$f'(\omega) = (4a\omega^2 - 3b\omega + 2c)\omega = 0.$$

В зависимости от значения коэффициента c и знака $D = 9b^2 - 32bc$ функция $f(\omega)$ может иметь экстремальные точки: $\omega = 0$, $\omega = \omega_1$, $\omega = \omega_2$ (рис. 4а).

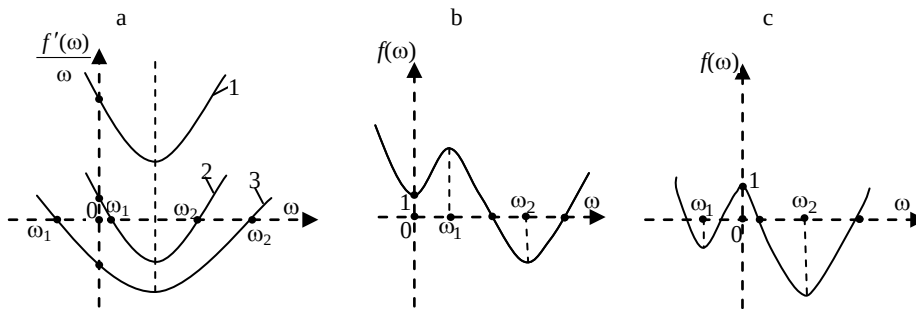


Рис. 4. Экстремальные точки (а) и графики функций $f(\omega)$ (b, c)

Fig. 4. Extreme points (a) and the graphs of functions $f(\omega)$ (b, c)

Для параболы 1: $D < 0$, $c > 0$; для параболы 2: $D > 0$, $c > 0$; для параболы 3: $D > 0$, $c < 0$ (рис. 4а). Экстремальная точка $(0,1)$ – это точка минимума или максимума функции $f(\omega)$ в зависимости от знака c . Из рис. 4 очевидно, что необходимое и достаточное условие существования стационарной точки АСГ выражается следующими соотношениями:

$$\begin{cases} D = 9b^2 - 32bc \geq 0; \\ f(\omega_2) \leq 0, \end{cases}$$

где $\omega_2 = (9b^2 + \sqrt{D})/8a$.

Электромагнитные переходные процессы АСГ описываются системой линейных автономных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Однако схема замещения автономного синхронного генератора содержит зависимые источники (рис. 5).

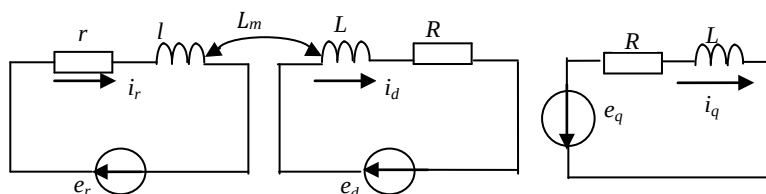


Рис. 5. Схема замещения автономного синхронного генератора ($e_d = \omega L i_q$; $e_q = \omega L i_d + \omega L_m i_r$)

Fig. 5. Equivalent circuit of an autonomous synchronous generator ($e_d = \omega L i_q$; $e_q = \omega L i_d + \omega L_m i_r$)

ВЫВОДЫ

1. Для автономного синхронного генератора с активно-индуктивной нагрузкой:

- математическая модель переходного процесса генератора идентична математической модели переходного процесса синхронной машины при трехфазном коротком замыкании;
- электромагнитный переходный процесс генератора устойчив;
- получено условие существования и устойчивости стационарной точки автономного синхронного генератора. Условие существования стационарной точки такого генератора не зависит от активного сопротивления нагрузки и статорной обмотки, а также от индуктивности ротора;
- при соблюдении условия существования стационарного режима генератор имеет две стационарные точки, из которых только одна является устойчивой.

2. Для автономного синхронного генератора с активно-емкостной нагрузкой:

- при пренебрежении переходным процессом в цепи ротора решение системы электромагнитного переходного процесса генератора устойчиво;
- определение стационарных точек генератора сводится к отысканию корней полинома четвертой степени;
- получено необходимое и достаточное условие существования и устойчивости стационарных точек автономного синхронного генератора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Торопцев, Н. Д. Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок / Н. Д. Торопцев. М.: Энергопрогресс, 2004. 89 с.
2. Горев, А. А. Переходные процессы синхронных машин / А. А. Горев. М.: Госэнергоиздат, 1985. 502 с.
3. Важнов, А. И. Основы теории переходных процессов синхронной машины / А. И. Важнов. М.: Госэнергоиздат, 1960. 312 с.
4. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В. А. Веников. М.: Высш. шк., 1985. 536 с.
5. Арешян, Г. Л. Специальные вопросы теории электрических машин переменного тока / Г. Л. Арешян. Ереван, 1999. 300 с.
6. Ковач, К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац. Л.: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.

7. Жданов, П. С. Вопросы устойчивости электрических систем / П. С. Жданов. М.: Энергия, 1979. 456 с.
8. Читечян, В. И. Синхронные и асинхронизированные генераторы автономных систем электроснабжения (системы возбуждения, разработка и применение) / В. И. Читечян. М.: МЭИ, 1990. 41 с.
9. Эрнст, А. Д. Электромеханические переходные процессы в электрических системах / А. Д. Эрнст. Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гос. ун-та, 2013. 130 с.
10. Иванов, В. А. Математические основы теории автоматического регулирования / В. А. Иванов, Б. К. Чемоданов, В. С. Медведев. М.: Высш. шк., 1971. 807 с.

Поступила 12.12.2016 Подписана в печать 06.03.2017 Опубликовано онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Toroptsev N. D. (2004) *Asynchronous Generators for Autonomous Power Installations*. Moscow, Energoprogress Publ. 89 (in Russian).
2. Gorev A. A. (1985) *Transient Processes of Synchronous Machines*. Moscow, Gosenergoizdat Publ. 502 (in Russian).
3. Vazhnov A. I. (1960) *Fundamentals of the Theory of Transient Processes of Synchronous Machines*. Moscow, Gosenergoizdat Publ. 312 (in Russian).
4. Venikov V. A. (1985) *Transient Electromechanical Processes in Electrical Systems*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 536 (in Russian).
5. Areshyan G. L. (1999) *Special Problems of the Theory of Electrical AC Machines*. Yerevan. 300 (in Russian).
6. Kovach K.P., Rats I. (1963) *Transients in AC Machines*. Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 744 (in Russian).
7. Zhdanov P. S. (1979) *Issues of Stability of Electric Systems*. Moscow, Energiya Publ. 456 (in Russian).
8. Chitechyan V. I. (1990) *Synchronous and Asynchronized Generators for Autonomous Power Supply Systems (Excitation System, Development and Application)*. Moscow, Moscow Power Engineering Institute. 41 (in Russian).
9. Ernst A. D. (2013) *Electromechanical Transients in Electrical Systems*. Nizhnevartovsk, Nizhnevartovsk State University Publ. 130 (in Russian).
10. Ivanov V. A., Chemodanov B. K., Medvedev V. S. (1971) *Mathematical Foundations of the Theory of Automatic Control*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 807 (in Russian).

Received: 12 December 2016 Accepted: 6 March 2017 Published online: 29 September 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-446-458

УДК 621.316.728

Системный анализ научно-технической информации по системам автоматического управления мощностью энергоблоков

Г. Т. Кулаков¹⁾, К. И. Артёменко¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Производство, преобразование, передача, распределение и потребление электроэнергии – один непрерывный процесс. Изменение нагрузки, т. е. уровня потребляемой электроэнергии, должно вызывать соответствующее ему изменение уровня вырабатываемой. Это значит, что в энергосистеме должен соблюдаться баланс производимой и потребляемой электроэнергии с учетом технологического расхода на преобразование, передачу и распределение. В противном случае будут нарушены показатели качества электроэнергии. Например, при нарушении баланса активной мощности частота в энергосистеме будет иметь значение, отличающееся от 50 Гц. Одним из автоматических устройств, находящихся на низшей ступени в иерархии автоматической системы диспетчерского управления частотой и потоками мощности, является система автоматического управления мощностью энергоблоков (САУМБ). Это комплексное сложное устройство, которое состоит из нескольких связанных вместе более простых систем, управляющих всеми теплоэнергетическими агрегатами энергоблока. САУМБ должна регулировать активную мощность энергоблока и участвовать в первичном регулировании частоты в сети с заданной точностью и чувствительностью, быть в должной мере быстродействующей. В то же время это устройство должно быть простым с точки зрения технической реализации, удобным в эксплуатации, позволять поддерживать на высоком уровне показатели экономичности, надежности, долговечности и экологичности работы энергоблоков. Чтобы одновременно выполнялись все эти требования (часто противоречащие друг другу), САУМБ должна иметь определенную структуру, которая зависит от состава и характеристик теплоэнергетического оборудования энергоблока и режимов его работы. Проведенный анализ известных САУМБ показал, что они не могут в полной мере удовлетворять современным требованиям стандартов к качеству регулирования частоты и мощности, т. е. типовые САУМБ нуждаются в структурно-параметрической оптимизации на базе экспресс-методов, разработанных в БНТУ.

Ключевые слова: экспресс-методы структурно-параметрической оптимизации, система автоматического управления мощностью энергоблоков, регулирование частоты и потоков активной мощности

Для цитирования: Кулаков, Г. Т. Системный анализ научно-технической информации по системам автоматического управления мощностью энергоблоков / Г. Т. Кулаков, К. И. Артёменко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 5. С. 446–458. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-446-458

Адрес для переписки

Кулаков Геннадий Тихонович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-45
tes@bntu.by

Address for correspondence

Kulakov Gennady T.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-45
tes@bntu.by

System Analysis of Scientific-and-Technical Information in Automatic Control System of Power Units Wattage

G. T. Kulakov¹⁾, K. I. Artsiomenka¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

The production, transformation, transmission, distribution and consumption of electricity is one continuous process. The change of the load, i.e. the level of energy consumption, should cause a corresponding change in the level of generated energy. It means that the power system should be a balance of produced and consumed energy, taking into account technological cost of conversion, transmission and distribution. Otherwise, electric power quality indicators will be violated. For example, at infringement of balance of active power the frequency in the grid will have a value different from 50 Hz. One of the automatic devices on the lowest rung in the hierarchy of automatic dispatcher control system of frequency and power interchange is the system of automatic control of power units (SACPU). It is a comprehensive and complex device, which consists of several connected together simpler systems, governing all thermal power devices of a power unit. SACPU ought to regulate the active power of the unit and participate in primary frequency regulation in the network with a given accuracy and sensitivity; also, it ought to be adequately fast. At the same time, this device should be simple from the point of view of technical implementation, easy to use, allow one to maintain a high level of efficiency, reliability, durability and environmental performance of the units. To satisfy all these requirements (often conflicting) simultaneously, SACPU should have a certain structure, which depends on the composition and characteristics of heat power equipment of the power unit and on operating modes. The analysis of known SACPU have demonstrated that they are unable to fully provide the requirements of the modern standards for quality control of frequency and power, i.e. the SACPU models are still in need of structural and parametric optimization on the basis of the proximate methods developed at the Belarusian National Technical University.

Keywords: proximate methods of structure-and-parametric optimization, automatic control system of power units wattage, control of frequency and active-power flows

For citation: Kulakov G. T., Artsiomenka K. I. (2017) System Analysis of Scientific-and-Technical Information in Automatic Control System of Power Units Wattage. *Energetika. Proc. CIS Hig-her Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (5), 446–458. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-446-458 (in Russian)

В настоящее время продолжается строительство Белорусской атомной электростанции (БелАЭС). Запланировано, что на станции будут введены в эксплуатацию два энергоблока мощностью по 1200 МВт. Пуск первого блока перенесен на 2019 г., пуск второго запланирован на 2020 г. Ввод в эксплуатацию БелАЭС, кроме многих положительных сторон, связан с некоторыми сложностями. Главными плюсами строительства станции являются:

- снижение потребности государства в природном газе, экспортируемом в основном из России. Потребление данного топлива, по расчетам, должно снизиться с 22 млрд м³ в 2015 г. до 17 млрд м³ в 2020 г., т. е. на 5 млрд м³;
- уменьшение выбросов парниковых газов на 7–10 млн т в год;
- по плану, с 2019 г. импортироваться электроэнергия в Республику Беларусь не будет.

Из последней положительной стороны и вытекают будущие сложности. После запуска в 2019 г. первого блока БелАЭС потребность страны в электроэнергии будет полностью покрыта имеющимися в стране мощностями. Но в 2020 г. будет запущен второй энергоблок БелАЭС. Эта мощность для

энергосистемы уже является излишней, т. е. ее необходимо экспортировать в смежные страны (Литву, Латвию и Эстонию). Страны Прибалтики до сих пор входят в объединенную энергосистему бывшего Советского Союза. Но в 2015 г. эти государства объявили, что будут синхронизироваться с энергосистемой континентальной Европы, прекращая старые связи.

Если эту излишнюю электроэнергию нельзя будет продать, следовательно, нужно в определенные моменты уменьшать выработку электроэнергии и соответственно снижать мощности работающих электростанций. В суточном графике нагрузки энергосистемы можно выделить три части: базовую, полупиковую и пиковую. В 2016 г. базовую часть графика электрических нагрузок покрывали теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), мини-ТЭЦ и блок-станции потребителей (наименее маневренные электростанции), полупиковую часть – конденсационные электростанции (КЭС), пиковую – импорт электроэнергии из соседних энергосистем. После пуска в 2020 г. БелАЭС будет покрывать базовую часть в суточном графике нагрузки энергосистемы, в полупиковой будут работать ТЭЦ, пиковую покроют КЭС [1]. Соответственно нужно будет переводить КЭС, работавшие в полупиковой части, в пиковую. Для того чтобы КЭС могли покрывать эту часть графика нагрузок, нужно применить новые принципы и устройства регулирования мощности энергоблоков электростанции, так как уже имеющиеся на них регуляторы не удовлетворяют новым условиям работы энергосистемы.

Качество регулирования перетоков мощности в энергосистеме определяет качество поступающей потребителям электроэнергии в целом, а в частности частоты переменного напряжения. Одной из систем, влияющих на качество регулирования частоты, является система автоматического управления мощностью энергоблоков (САУМБ) [2]. В 2013 г. выпущен стандарт, действие которого распространяется на энергоблоки тепловых электростанций, предназначенные для участия в нормированном первичном и автоматическом вторичном регулировании частоты электрического тока и перетоков мощности. Этот нормативный документ пришел на смену аналогичному стандарту 2005 года выпуска. В новой редакции смягчены требования к системам первичного регулирования частоты энергоблоков при аварийном скачкообразном изменении частоты. Также стандарт устанавливает системные технические требования к энергоблокам тепловых электростанций и методику испытаний для проверки этих требований.

Система первичного регулирования частоты должна соответствовать описанным ниже техническим требованиям. При скачкообразном изменении частоты соответствующее изменение мощности энергоблока под воздействием системы первичного регулирования должно происходить таким образом, чтобы полная требуемая величина изменения мощности в пределах заданного нормального резерва первичного регулирования была достигнута за 30 с. Также в данном случае достижение 50 % требуемой величины изменения мощности должно осуществляться в течение не более 10 с [3].

Требования к динамике изменения мощности энергоблока в пределах нормального резерва показаны на рис. 1.

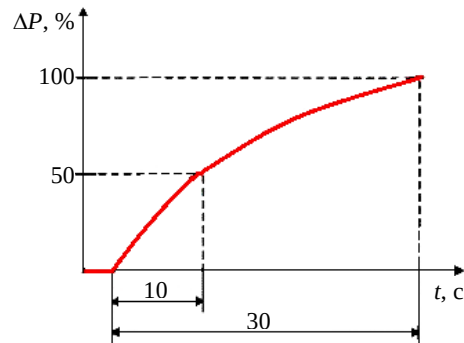


Рис. 1. Требования к динамике первичного регулирования энергоблока в пределах нормального резерва

Fig. 1. Requirements for dynamics of a power unit primary control in the range of a normal reserve

В случае аварийного скачкообразного изменения частоты соответствующее изменение мощности энергоблока под действием системы первичного регулирования должно происходить так, чтобы полная требуемая величина изменения мощности в пределах заданного аварийного резерва первичного регулирования была достигнута за 5 мин для энергоблоков, работающих на газе, и за 6 мин – для энергоблоков, работающих на угле. При этом достижение 50 % требуемой величины изменения мощности должно осуществляться в течение не более 15 с [3].

Требования к динамике изменения мощности энергоблока в пределах аварийного резерва показаны на рис. 2.

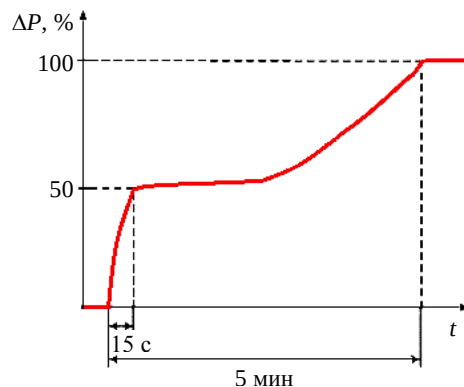


Рис. 2. Требования к динамике первичного регулирования энергоблока в пределах аварийного резерва

Fig. 2. Requirements for dynamics of a power unit primary control in the range of emergency reserve

За последние 20 лет предложено множество новых модификаций систем автоматического управления мощностью энергоблоков. Коллек-

тив авторов из ОАО «Инженерный Центр ЕЭС» (Россия) во главе с Ю. Р. Ительманом запатентовал систему автоматического регулирования мощностью энергоблоков, гораздо более чувствительную по сравнению с другими к отклонениям частоты [4]. Еще один вариант САУМБ предложили в своем патенте сотрудники немецкой компании «Сименс Акциен-гезельшафт» [5]. С 2004 по 2008 г. ЗАО «Интеравтоматика» во главе с докт. техн. наук, проф. В. А. Биленко проводилась модернизация восьми блоков Ириклинской ГРЭС (Россия) мощностью 300 МВт для соответствия их нормам участия энергоблоков ТЭС в нормированном первичном и автоматическом вторичном регулировании частоты и мощности [6].

Главными недостатками всех описанных выше устройств являются:

- уменьшение времени регулирования достигается за счет увеличения максимальной величины регулирующих воздействий на систему автоматического регулирования мощностью энергоблоков;
- увеличение максимальной величины регулирующих воздействий приводит к значительному ухудшению экономических показателей работы всего энергоблока.

Коллективом ученых во главе с докт. техн. наук Н. И. Давыдовым из Всероссийского теплотехнического института был разработан вариант системы автоматического управления мощностью для энергоблока 300 МВт № 6 Каширской ГРЭС (Россия) с паровой турбиной К-300-240-2 и газомазутным прямоточным котлом ТГМП-314А [7]. Аналогичная САУМБ установлена на блоках 300 МВт Конаковской ГРЭС (Россия) [8]. На указанных энергоблоках в составе их АСУТП на базе программно-технического комплекса (ПТК) «Квинт» и разработанной американской фирмой CCC (Compressor Controls Corporation) микропроцессорной системы регулирования турбины реализованы САУМБ энергоблоков, построенные по принципу САУМ-1. Данное устройство было разработано в 2005 г. до ввода в действие норм [3] и получило широкое распространение на территории Российской Федерации [9]. Функция поддержания в статике заданной мощности возлагается на регуляторы, воздействующие на органы регулирования нагрузки котла, а заданного значения давления пара или положения клапанов турбины – на регулятор, воздействующий на регулирующие клапаны турбины. В состав САУМБ входят: формирователь задания по мощности с учетом указанных выше функций и являющиеся центральной частью САУМБ котельный (КРМ) и турбинный (ТРМ) регуляторы мощности, первый из которых формирует задание по расходу топлива, а второй воздействует на регулирующие клапаны турбины.

Структурная схема САУМБ энергоблока № 6 Каширской ГРЭС изображена на рис. 3.

На рис. 3 использованы следующие обозначения: ЗПМ – задатчик плановой мощности; ЧК – частотный корректор; Σ – сумматор; $N_{зд}$ – заданное значение мощности энергоблока; $N_{зд,пл}$ – плановая составляющая мощности; $N_{зд,кон}$ – конечное значение плановой мощности; МИН – элемент, выделяющий минимум из нескольких сигналов; МАКС – элемент, выделяющий максимум из нескольких сигналов.

ляющий максимум из нескольких сигналов; $(dN/dt)_{зд}$ – скорость перехода плановой мощности от начального значения к конечному; $\Delta n = n - n_{ном}$ – отклонение частоты вращения ротора от номинального значения; $N_{макс}$ – верхнее значение регулировочного диапазона; $N_{мин}$ – нижнее значение регулировочного диапазона; N – фактическая мощность энергоблока; D – дифференциатор; p'_t – фактическое давление перегретого пара перед турбиной; $p'_{т.зд}$ – заданное давление перегретого пара перед турбиной; $H_{т.зд}$ – заданное значение положения регулирующих клапанов турбины; H_t – фактическое положение регулирующих клапанов турбины; ПИ – пропорционально-интегральный регулятор; $F_{т.зд}$ – задание по расходу топлива в котел; α_1, α_2 – коэффициенты чувствительности; K – ключ.

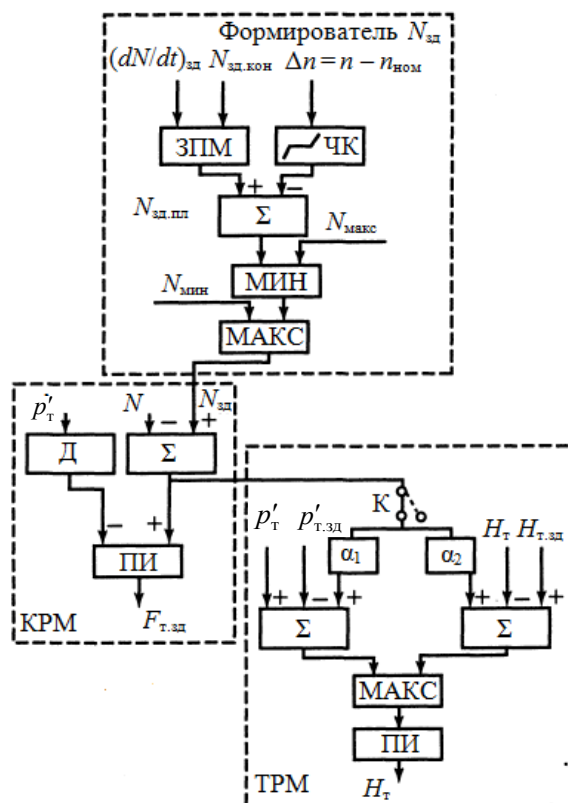


Рис. 3. Структурная схема системы автоматического управления мощностью энергоблоков энергоблока № 6 Каширской ГРЭС

Fig. 3. The structure diagram of the Unit No 6 SACPU of the Kashirskaya GRES (state district power plant)

Переходные процессы при испытаниях САУМБ энергоблока № 6 Каширской ГРЭС при скачкообразном увеличении $N_{зд}$ на 10 % в режиме номинального давления пара изображены на рис. 4.

Для анализа переходных процессов необходимы прямые показатели качества (ППК). Сведем их в табл. 1.

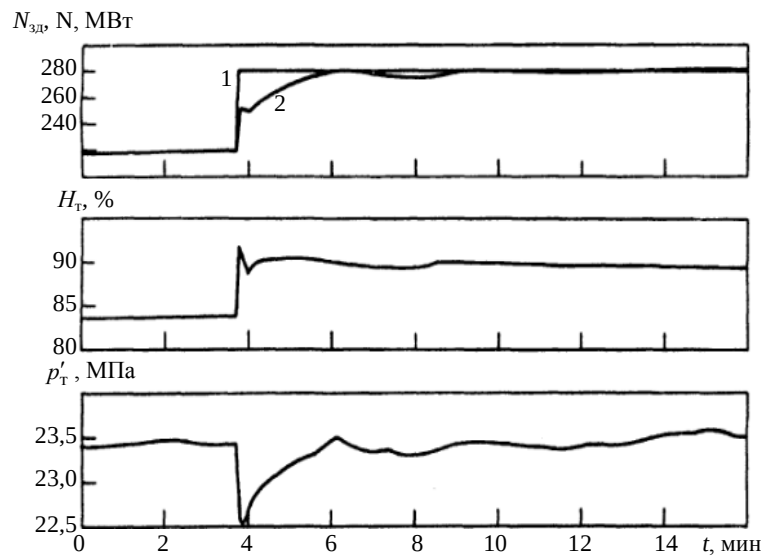


Рис. 4. Переходные процессы системы автоматического управления мощностью энергоблока № 6 Каширской ГРЭС при скачкообразном увеличении заданной мощности на 10 % в режиме номинального давления пара: 1 – заданная мощность; 2 – фактическая мощность

Fig. 4. Transient processes of the Unit No 6 SACPU of the Kashirskaya GRES for abrupt increase of preset power to 10 % in a normal steam pressure regime: 1 – preset power; 2 – available power

Таблица 1

Прямые показатели качества системы автоматического управления мощностью энергоблока № 6 Каширской ГРЭС

Direct indicators of quality of the Unit No 6 SACPU of the Kashirskaya GRES (state district power plant)

Вид возмущения	Параметр	Показатель	Типовая САУМБ
$N_{зд}$	N_{ϕ}	t_p, c	740
		A_m^+	1,01
		A_m^-	0,88
		X_T^p	1,05
	p_0	t_p, c	740,00
		A_m^+	1,00
		A_m^-	0,96

Обозначения: $N_{зд}$, N_{ϕ} – заданная и фактическая мощности энергоблока; p_0 – давление перегретого пара перед турбиной; t_p – полное время регулирования; X_T^p – изменение регулирующего воздействия турбины; $A_m^{\pm}$ – максимальная динамическая ошибка регулирования с учетом знака.

Система автоматического управления мощностью энергоблока Всероссийского теплоэнергетического института достигает 50 % требуемой величины изменения мощности за 4 с [7]. Полное время регулирования САУМБ энергоблока № 6 Каширской ГРЭС составляет более 740 с, что не удовлетворяет требованиям стандарта Системного оператора Единой энергосистемы [3].

Проанализируем варианты САУМБ, которые в 1980-е гг. были разработаны и внедрены на восьми блоках Лукомльской ГРЭС Южным отделением «Южтехэнерго», БЭРН, БПИ во главе с Г. Т. Кулаковым. Структурные схемы типовой САУМБ, первой [10] и второй ее модификаций приведены на рис. 5.

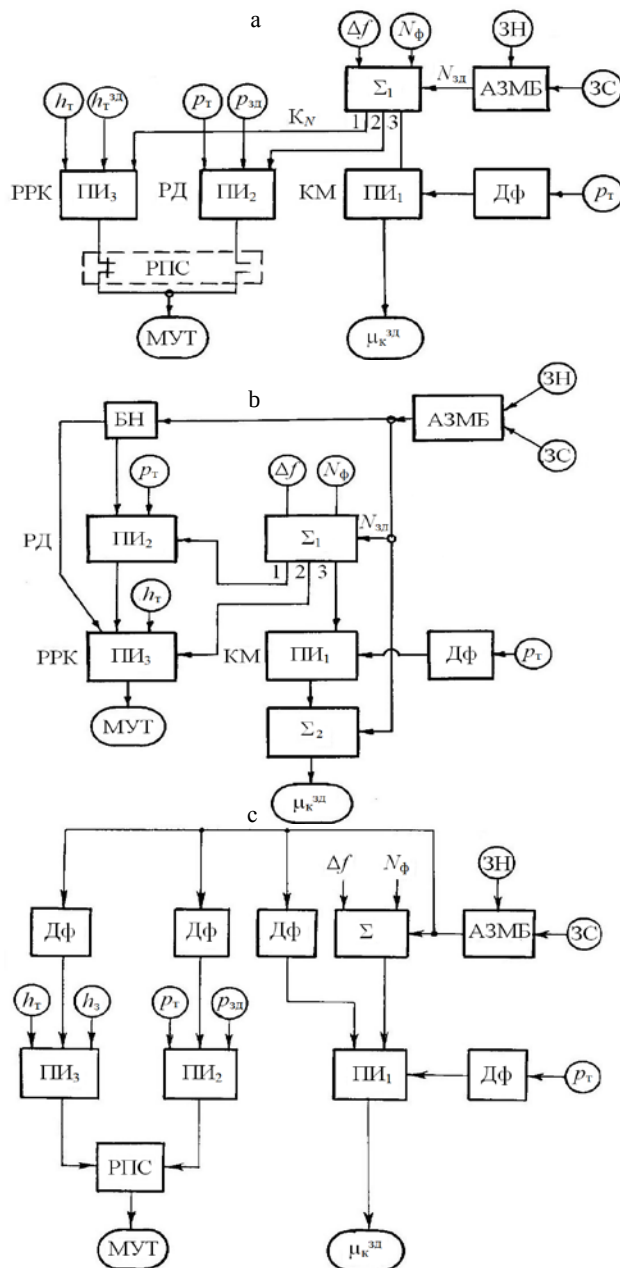


Рис. 5. Структурные схемы системы автоматического управления мощностью энергоблоков Лукомльской ГРЭС: а – типовой; б – первой модификации; с – второй модификации

Fig. 5. The structure diagrams of the Lukoml'skaya GRES units SACPU:
a – typical; b – first upgrading; c – second upgrading

На рис. 5 использованы следующие обозначения: АЗМБ – автоматический задатчик мощности блока; ЗН – задатчик нагрузки; ЗС – задатчик скорости; $N_{зд}$ – заданное значение мощности энергоблока; $N_{ф}$ – фактическая электрическая мощность; Σ_1 – сумматор измерительного блока; Δf – частота электрической сети; K_N – весовой коэффициент; КМ – котельный регулятор мощности; $\mu_k^{зд}$ – задание регулятором нагрузки котла; РРК – стабилизатор положения регулирующих клапанов; РД – регулятор давления; МУТ – механизм управления турбиной; РПС – реле переключения состояния; p_t – давление перегретого пара перед турбиной; $p_{зд}$ – заданное давление перегретого пара перед турбиной; $h_t^{зд}$ – заданное значение положения регулирующих клапанов турбины; h_t – положение регулирующих клапанов турбины; $D_{ф}$ – дифференциатор инвариантности; ПИ₁, ПИ₂, ПИ₃ – пропорционально-интегральные регуляторы; БН – блок нелинейности; h_3 – заданное значение положения регулирующих клапанов турбины.

Промышленные испытания этих модификаций, проведенные на пятом энергоблоке Лукомльской ГРЭС в августе 1978 г., показывают, что в динамическом отношении эти системы близки друг к другу [11]. На рис. 6 изображены переходные процессы различных модификаций САУМБ Лукомльской ГРЭС при 10%-м скачкообразном изменении задания в режиме постоянного давления пара перед турбиной. Цифре I соответствует типовой вариант системы регулирования; II – первая модификация; III – вторая модификация.

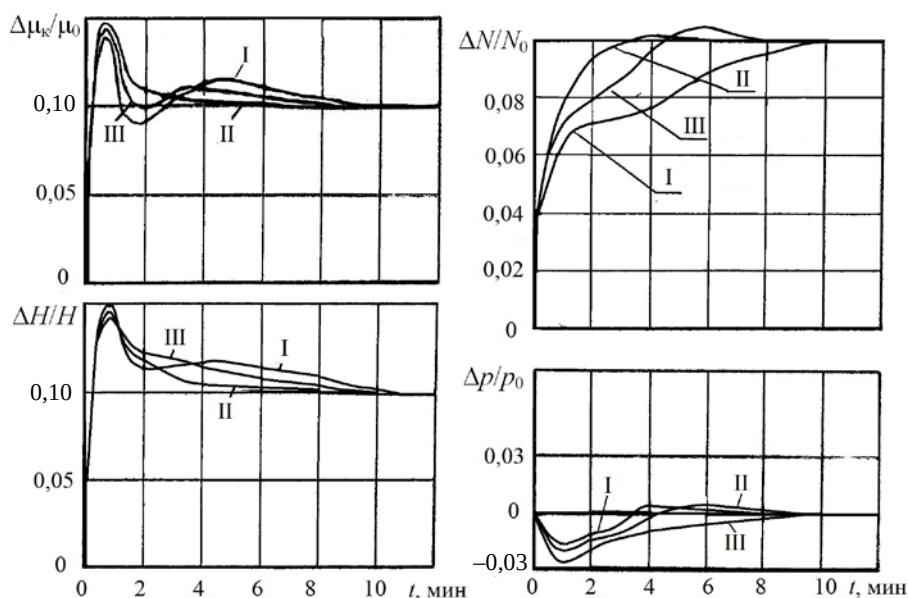


Рис. 6. Переходные процессы различных модификаций системы автоматического управления мощностью энергоблоков при 10%-м скачкообразном изменении задания в режиме постоянного давления пара перед турбиной

Fig. 6. Transient processes of the SACPU different upgrades for abrupt assignment change to 10 % in a regime of a normal steam pressure before the turbine

На рис. 6 использованы следующие обозначения: $\Delta\mu_k/\mu_0$ – относительное изменение расхода топлива; $\Delta H/H$ – относительное перемещение регулирующих клапанов турбины; $\Delta N/N_0$ – относительное изменение электрической мощности; $\Delta p/p_0$ – относительное изменение давления пара перед турбиной.

Переходные процессы различных модификаций САУМБ Лукомльской ГРЭС при внутреннем возмущении изображены на рис. 7. Цифре 1 соответствует типовому варианту системы регулирования; 2 – первая модификация; 3 – вторая модификация.

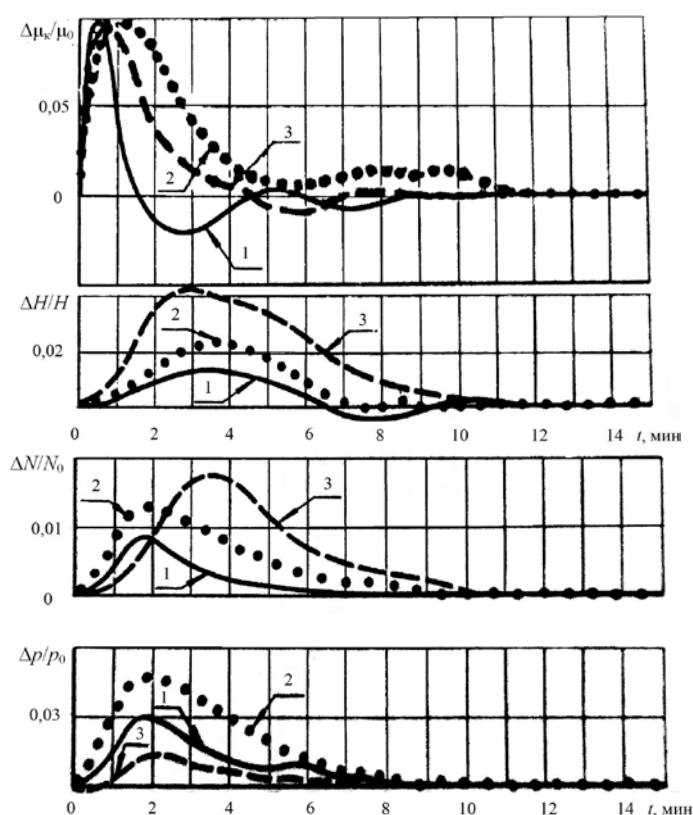


Рис. 7. Переходные процессы различных модификаций системы автоматического управления мощностью энергоблоков при внутреннем возмущении в режиме постоянного давления пара перед турбиной

Fig. 7. Transient processes of SACPU different upgrades for internal disturbance in a regime of a normal steam pressure before the turbine

Сведем прямые показатели качества для трех вариантов САУМБ Лукомльской ГРЭС в табл. 2.

Обозначения в табл. 2 соответствуют табл. 1, только f_1 – внутреннее возмущение; X_{ϵ}^{δ} – изменение регулирующего воздействия котла; σ_m – максимальная величина перерегулирования.

Таблица 2

**Прямые показатели качества системы автоматического управления
мощностью энергоблоков Лукомльской ГРЭС**

**Direct indicators of quality of the SACPU
of the Lukoml'skaya GRES**

Вид возмущения	Параметр	Показатель	Типовая САУМБ	Первая модификация	Вторая модификация
$N_{зд}$	N_{ϕ}	t_p , с	600	370	500
		σ_m , %	0	3	5
		X_T^p	1,5	1,4	1,45
	p_0	t_p , с	310	540	540
		A_m^+	0,005	0,006	0
		A_m^-	-0,018	-0,022	-0,027
		X_K^p	1,4	1,5	1,45
f_1	N_{ϕ}	t_p , с	420	540	600
		A_m^+	0,08	0,13	0,18
		X_T^p	1	1	1
	p_0	t_p , с	500	520	460
		A_m^+	0,03	0,048	0,012
		X_K^p	0,1	0,1	0,1

Первая модификация системы автоматического управления мощностью энергоблока Лукомльской ГРЭС достигает 50 % требуемой величины изменения мощности за 10 с. В то же время типовая и вторая модификации отрабатывают 50 % задания лишь за 30 и 25 с соответственно.

Полное время регулирования для типовой модификации составляет 600 с, для первой модификации – 370 с, а для второй – 500 с. Это больше 300 с, требуемых стандартом.

Соответственно ни одна из модификаций с учетом требований к надежности работы котлов и турбин не удовлетворяет требованиям СО ЕЭС [3]. Все они нуждаются в модернизации, например на основе экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации [12].

ВЫВОДЫ

1. Известные системы автоматического управления мощностью энергоблоков не могут удовлетворять современным требованиям стандартов к качеству регулирования частоты и мощности без существенного увеличения максимальных относительных величин регулирующих воздействий клапанами турбины и задающих воздействий котельным регулятором нагрузки.

2. Увеличение максимальных относительных величин регулирующих воздействий клапанами турбины и задающих воздействий котельным регулятором нагрузки приводит к ухудшению показателей экономичности, надежности, долговечности и экологичности работы энергоблоков.

3. Модернизацию системы автоматического управления мощностью энергоблоков целесообразно проводить на базе экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации, разработанных в БНТУ.

4. В качестве базы для структурно-параметрической оптимизации следует выбрать систему, установленную на Лукомльской ГРЭС, так как по результатам сравнения прямых показателей качества она гораздо быстрее отрабатывает скачок задания, чем система автоматического управления мощностью энергоблоков ВТИ, несмотря на несколько большее время регулирования при внутреннем возмущении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Интеграция белорусской АЭС в энергосистему: влияние на национальную безопасность и экономическое развитие / Т. Г. Зорина [и др.] // Экономика и управление. 2015. № 4. С. 60–65.
2. Плетнев, Г. П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике / Г. П. Плетнев. 4-е изд., перераб. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 352 с.
3. Нормы участия энергоблоков тепловых электростанций в нормированном первичном регулировании частоты и автоматическом вторичном регулировании частоты и перетоков активной мощности: СТО 59012820.27.100.002–2013. Введ. 25.04.2013. М.: ОАО «СО ЕЭС», 2013. 36 с.
4. Система автоматического регулирования мощности энергоблока: пат. 2258146 Рос. Федерация: МПК F 01 K 13/02 / Ю. Р. Ительман, Л. Н. Касьянов, Ф. Л. Коган и др.; дата публ. 10.08.2005.
5. Спосіб і пристрій для швидкого регулювання потужності енергетичної установки з турбоагрегатом: пат. 42851 Украина: F 01 K 13/02 / О. Зависка, К. Фрикке, Г. Фурумото; дата публ. 15.11.2001.
6. Адаптация СКУ энергоблоков 300 МВт Ириклинской ГРЭС к современным требованиям эксплуатации / В. А. Биленко [и др.] // Электрические станции. 2009. № 2. С. 65–74.
7. Давыдов, Н. И. Результаты испытаний и модельных исследований системы автоматического управления мощностью газомазутного энергоблока 300 МВт / Н. И. Давыдов, Д. Г. Бояршинов, Н. В. Зорченко // Теплоэнергетика. 2005. № 10. С. 36–41.
8. Система автоматического управления мощностью энергоблока 300 МВт Конаковской ГРЭС / Н. И. Давыдов [и др.] // Теплоэнергетика. 2006. № 7. С. 43–49.
9. Давыдов, Н. И. Анализ результатов сертификационных испытаний энергоблоков 200, 300 и 800 МВт по проверке готовности к участию в нормированном регулировании частоты / Н. И. Давыдов, Н. В. Зорченко // Электрические станции. 2008. № 11. С. 4–8.
10. Система регулирования энергоблока: а. с. 657179 СССР: МПК F 01 K 13/02 / Г. Т. Кулаков, М. Н. Терешко, В. И. Литвинец и др.; № 2350974/24-06; заявл. 21.04.1976; дата публ. 15.04.1979.
11. Кулаков, Г. Т. Теоретические основы экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации систем автоматического управления для повышения эффективности использования теплоэлектростанций в переменных режимах / Г. Т. Кулаков. Минск, 1990. 450 с.

12. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами / Г. Т. Кулаков [и др.]; под общ. ред. Г. Т. Кулакова. Минск: Вышэйш. шк., 2017. 240 с.

Поступила 29.03.2017 Подписана в печать 02.06.2017 Опубликовано онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Zorina T. G., Rak V. A., Tkachev V. A., Shershunovich E. S. (2015) The Belarusian NPP Integration into Power Supply System: Influence on the National Security and Economic Development. *Ekonomika i Upravlenie* [Economics & Management], (4), 60–65 (in Russian).
2. Pletnev G. P. (2007) *Automation of Technological Processes and Productions in Heat Power Engineering*. 4th Edition. Moscow: Moscow Power Engineering Institute Publishing House. 352 (in Russian).
3. Enterprise Standard 59012820.27.100.002–2013. Norms of Participation of Heat Power Plants' Power Generator Units in a Standardized Primary Frequency Control, an Automatic Secondary Frequency Control and Active Power Flows (2013). Moscow, "SO EES" Open JSC. 36. (in Russian).
4. Itel'man Ju. R., Kas'yanov L. N., Kogan F. L., Mikhaylova I. P., Nazarov V. E., Taran O. E., Tereshchenko V. K. (2005) Automatic Power Control System of a Generating Unit. Patent of the Russian Federation No 2258146 (in Russian).
5. Zaviska O., Fricke C., Furumoto H. (2001) Method and Unit for Quick Control of Power of a Power Unit with a Turbo Device. Patent of the Ukraine No 42851 (in Ukrainian).
6. Bilenko V. A., Chernomzav I. Z., Kuznetsov N. A., Rogachev R. L., Nefedov K. A., Gushchin F. Yu., Kirillov N. G., Kindyakov V. N., Butskikh V. V., Sadykov V. S. (2009) Adapting the Monitoring and Control Systems on the 300 MW Power Generation Units at the Iriklin-skaya GRÉS to Modern Operational Requirements. *Power Technology and Engineering*, 43 (3), 170–179. DOI: 10.1007/s10749-009-0093-4.
7. Davydov N. I., Boyarshinov D. G., Zorchenko N. V. (2005) Results of the Tests and Model Research of the Automatic Power Governing System for a 300-MW Gas-and-Oil-Fired Power Unit. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, (10), 36–41 (in Russian).
8. Davydov N. I., Grigorenko A. A., Zorchenko N. V., Pavlova M. F., Basharin V. V., Nazarov A. A., Baibara V. I., Babykin V. G., Anufriev V. V., Korotnikov P. I. (2006) The Automatic Power Control System for the 300 MW Unit at the Konakovo District Power Station. *Thermal Engineering*, 53 (7), 538–545. DOI: 10.1134/s004060150607007x.
9. Davydov N. I., Zorchenko N. V. (2008) Analysis of the Results of the Certification Tests of 200, 300 and 800 MW Units to Check the Readiness to Participate in Normalized Frequency Regulation. *Electricheskie Stantsii = Power Technology and Engineering*, (11), 4–8 (in Russian).
10. Kulakov G. T., Tereshko M. N., Litvinets V. I., Volnyanko M. G., Pirogov V. G., Kurilin L. A., Manujlov V. K. (1979) Power Unit Regulating System. USSR Patent No 657179 (in Russian).
11. Kulakov G. T. (1990) *Theoretical Fundamentals of Proximate Methods of Structural and Parametric Optimization of Automatic Control Systems to Improve Efficiency of the Use of Heat Power Plants of in Variable Regimes*. Minsk. 450 (in Russian).
12. Kulakov G. T., Kulakov A. T., Kravchenko V. V., Kuchorenko A. N., Artsiomenka K. I., Kovri-go Yu. M., Golinko I. M., Bagan T.G., Bunke A. S. (2017) *Automatic Control Theory for Heat Power Processes*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 240 (in Russian).

Received: 29 March 2017

Accepted: 2 June 2017

Published online: 29 September 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-459-469

УДК 534.14:532.542

Исследование гидравлических ударов при заполнении системы компенсации давления в водоводяных энергетических реакторах

А. В. Королев¹⁾, А. П. Ищенко²⁾, О. П. Ищенко²⁾

¹⁾Одесский национальный политехнический университет (Одесса, Украина),

²⁾ОП «Южно-Украинская АЭС» (Южноукраинск, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Представленное в статье исследование согласуется с тяжелой аварией, произошедшей на АЭС Три-Майл-Айленд в США. Исследование направлено на повышение надежности работы компенсатора давления – важного оборудования первого контура. Для моделирования подобной ситуации был разработан стенд, имитирующий конструкцию компенсатора давления реактора ВВЭР-440, в частности формой верхней эллиптической крышки, которая имеет патрубок отвода пара в самом верхе конструкции, что создает условия для появления подобных гидравлических ударов. Для проведения экспериментов создана установка, позволяющая измерять и регистрировать гидроудары, возникающие при заполнении емкостей. Измерение амплитуды гидроударов осуществлялось специально разработанным пьезодатчиком, а регистрация – на светолучевом осциллографе. Описана методика проведения эксперимента и представлены результаты экспериментального исследования гидроударов, возникающих при полном заполнении сосудов. Получены количественные данные по амплитудам гидроударов в зависимости от скорости заполнения емкости и диаметра выходного отверстия, максимальные давления гидроудара составили 7–9 атм. Выполнено сравнение расчетных и экспериментальных данных, допустимое расхождение объясняется расчетной величиной коэффициента жесткости системы, который не учитывал наличие сварных швов в баке, придающих системе дополнительную жесткость. Получены расчетные соотношения, позволяющие оценить амплитуды гидроударов через ускорение уровня воды перед выходным отверстием из сосуда с эллиптическим днищем. Экспериментально и теоретически показана возможность возникновения гидравлического удара в компенсаторе давления. На основании данных эксперимента может быть расширен перечень исходных событий тяжелых аварий на АЭС с водоводяным энергетическим реактором.

Ключевые слова: гидроудар, емкость, система компенсации давления, тяжелая авария, водоводяной энергетический реактор

Для цитирования: Королев, А. В. Исследование гидравлических ударов при заполнении системы компенсации давления в водоводяных энергетических реакторах / А. В. Королев, А. П. Ищенко, О. П. Ищенко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60. № 5. С. 459–469. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-459-469

Адрес для переписки

Королев Александр Викторович
Одесский национальный политехнический университет
просп. Шевченко, 1,
65044, г. Одесса, Украина
Тел.: +38 048 734-86-04
npp.pei.opu@ukr.net

Address for correspondence

Korolyev Alexander V.
Odessa National Polytechnic University
1 Shevchenko Ave.,
65044, Odessa, Ukraine
Tel.: +38 048 734-86-04
npp.pei.opu@ukr.net

Study of Water Hammers in the Filling of the System of Pressure Compensation in the Water-Cooled and Water-Moderated Power Reactors

A. V. Korolyev¹⁾, A. P. Ishchenko²⁾, O. P. Ishchenko²⁾

¹⁾Odessa National Polytechnic University (Odessa, Ukraine),

²⁾SD "South-Ukraine Nuclear Power Plant (NPP)" (Yuzhnoukrainsk, Ukraine)

Abstract. The research presented in the article conforms to the severe accident that took place at the Three Mile Island nuclear power plant in the USA. The research is focused on improving the reliability of the pressure compensator that is an important equipment of the primary circuit. In order to simulate such a situation, the stand has been developed to simulate the design of the pressurizer of the PWR-440 reactor, in particular an elliptical shape of the upper lid which has a steam outlet pipe at the top of the construction that creates conditions for occurrence of such water hammers. For the experiments, an installation has been created that makes it possible to measure and record the water hammering that occur when the tanks are filled. Measurement of the amplitude of the water hammering was carried out by a specially developed piezoelectric sensor, and the registration – by a light-beam oscilloscope. The technique of carrying out the experiment is described and the results of an experimental study of the water hammers arising when the vessels are completely filled are presented. Quantitative data were obtained on the amplitudes of the hydraulic impacts depending on the rate of filling of the vessel and the diameter of the outlet, the maximum pressure of the hydraulic shock was 7–9 atm. Comparison of calculated and experimental data has been performed. The allowable discrepancy is explained by the calculated value of the system stiffness coefficient, which did not take into account the presence of welded seams in the tank that imparts the system with additional rigidity. The calculated relationships are obtained, that make it possible to estimate the amplitudes of the water hammers through the acceleration of the water level in front of the outlet from a vessel with an elliptical bottom. The possibility of a water hammer in the pressure compensator is demonstrated by experiment and by theoretical calculations. Based on the experimental data, a list of initial events of severe accidents at NPPs with a water-cooled and water-moderated power reactor can be expanded.

Keywords: water hammer, tanks, pressurizer system, severe accident, water-cooled and water-moderated power reactor

For citation: Korolyev A. V., Ishchenko A. P., Ishchenko O. P. (2017) Study of Water Hammers in the Filling of the System of Pressure Compensation in the Water-Cooled and Water-Moderated Power Reactors. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Egn. Assoc.* 60 (5), 459–469. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-459-469 (in Russian)

Введение

К исследованию данного вопроса подтолкнули события далекого 1978 г. на АЭС Три-Майл-Айленд (США) [1]. Тогда главным действующим оборудованием оказался компенсатор давления (КД), на котором отказал предохранительный клапан, что было вызвано попаданием воды в его систему управления [2], которое могло быть вызвано гидроударом. Учитывая тот факт, что атомные электрические станции с водоводяными энергетическими реакторами (ВВЭР), сейчас находящимися в эксплуатации, проектировались и строились по нормативным документам СССР 1970-х гг. [3], необходима корректировка перечня исходных событий, приводящих к тяжелым авариям, так как вследствие крайне тяжелых радиационных и социально-экономических последствий тяжелые аварии могут вносить замет-

ный вклад в общую величину риска от эксплуатации АЭС [4]. В связи с введением возможности аварийного охлаждения первого контура АЭС с ВВЭР через режим «сброса–питания» предусматривается полное заполнение объема компенсатора давления теплоносителем. В этом случае возрастает вероятность появления гидравлического удара, что доказано примером экспериментальных исследований, представленных в [5], где авторы исследовали явление гидроудара при заполнении трубопровода криогенной жидкостью с образованием паровой полости перед запорным органом (рис. 1).

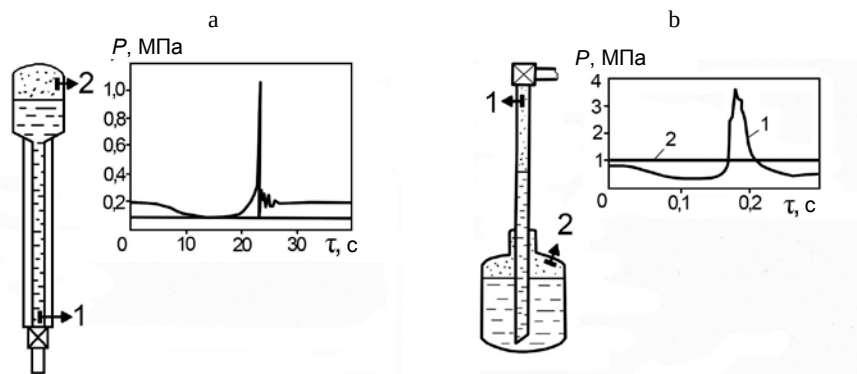


Рис. 1. Принципиальные схемы заполнения сосудов и появления гидравлического удара в них [5]

Fig. 1. The key diagrams of filling vessels and the appearance of a water hammer in them [5]

При открытии запорного устройства пар, который находится перед ним, быстро эвакуируется, давление перед клапаном резко падает, жидкость ускоряется, а при подходе к клапану резко тормозится и возникает гидравлический удар.

Конструкция компенсатора давления, подобная используемой на блоках с ВВЭР-440, имеет патрубок отвода пара в самом верху конструкции, что создает условия для появления подобных гидравлических ударов. Здесь следует заметить, что в КД имеется более пяти уровнемеров, каждый из которых является потенциально слабым звеном при возникновении гидравлического удара.

Для моделирования подобной ситуации был разработан стенд, имитирующий конструкцию компенсатора давления ВВЭР-440, в частности формой верхней эллиптической крышки. Принципиальная схема и эскиз стенда представлены на рис. 2, 3.

Бак 1 являет собой обечайку, в которой выполнены штуцеры для подведения воды и подключения датчика давления 2 (рис. 2), а также для подсоединения канала слива воды. В верхней эллиптической крышке находится штуцер 3, в котором с помощью шайбы 4 закрепляется пластина 5 с фиксированным отверстием (рис. 3). В ходе эксперимента использовались семь пластин с диаметрами отверстий 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 и 4,5 мм.

Сигнал от датчика поступает на осциллограф и регистрируется с помощью фотоаппарата Panasonic DMC-FS10 (на схеме не представлен).

Для фотографирования был выбран режим с 15-секундной выдержкой, а для получения качественных снимков фотоаппарат и осциллограф помещались в светонепроницаемый короб.

Подача воды в установку регулируется вентилем 8, а слив – вентилем 7.

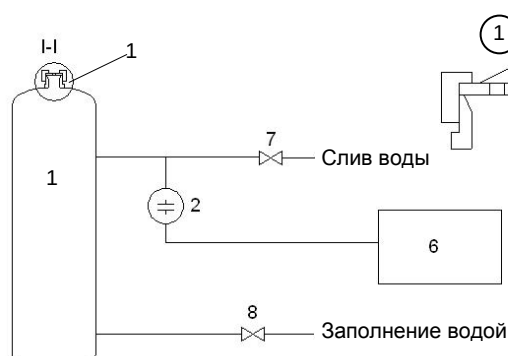


Рис. 2. Принципиальная схема стенда: 1 – емкость; 2 – датчик давления; 3 – штуцер; 4 – накидная гайка; 5 – шайба с отверстием; 6 – осциллограф С1-69; 7, 8 – регулирующие вентили

Fig. 2. The schematic diagram of the stand: 1 – tank; 2 – pressure sensor; 3 – valve seat; 4 – coupling ring; 5 – washer with a hole; 6 – C1-69 oscilloscope; 7, 8 – regulating valves

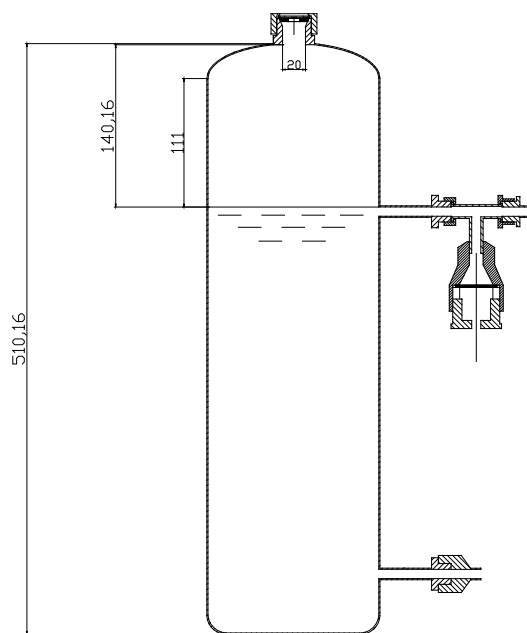


Рис. 3. Эскиз рабочей ячейки стенда

Fig. 3. A sketch of the working cell bench

Для измерения гидравлических ударов из пластинки пьезокерамики ЦТС-19 размером $\varnothing 33 \times 2$ мм был изготовлен пьезоэлектрический датчик, подобный используемому в [6]. Сигнал с датчика поступал на вход

осциллографа С1-69, где усиливался и отображался на экране осциллографа. Перед экспериментами выполнялась калибровка датчика прецизионным прессом МПС-150.

Далее емкость 1 предварительно полностью заполнялась водой, а в месте шайбы с отверстием, регулирующей расход, устанавливалась шайба без отверстия. Таким образом, в нем установилось давление, равное давлению в системе водоснабжения. Затем резко открывался клапан, отвечающий за слив воды. Из-за несжимаемости воды давление в установке скачкообразно снижалось до атмосферного, таким образом, напрямую устанавливалось соответствие перепада давления показаниям осциллографа.

Эксперимент выполнялся по следующей методике. Закрывался вентиль на линии, подающей воду, и снималась шайба без отверстия (заглушка). Затем открытием сбросного вентиля сливался заданный объем воды из установки. На выходной штуцер устанавливалась шайба с отверстием заданного диаметра, а на эллиптическое днище – защитный колпак, предотвращающий попадание воды в помещение и на приборы.

Затем открывался клапан на линии, подводящей воду, и одновременно включались секундомер и фотоаппарат. Секундомер фиксировал время заполнения верхней половинки емкости и соответственно скорость заполнения бака, а фотоаппарат регистрировал характер и величину гидравлического удара (рис. 4). Затем эксперимент повторяли, причем после проведения экспериментов на одном диаметре шайбы переходили к другому диаметру.

Для устранения погрешности, связанной с возможным наличием пузырьков газа в емкости, выбрали средние максимальные значения гидроудара для каждого отверстия (табл. 1.).

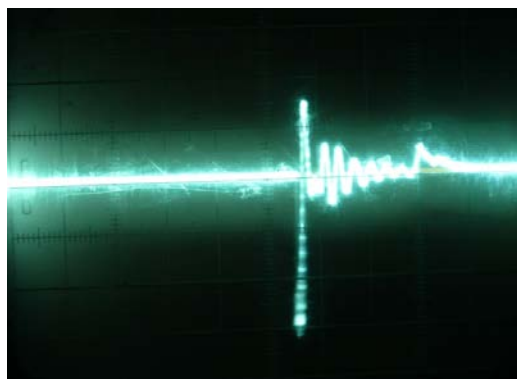


Рис. 4. Характер осциллограмм при гидравлическом ударе

Fig. 4. The nature of the waveforms in the water hammering

Зависимость силы гидравлического удара от диаметра отверстия в пластине представлена на рис. 5, от массового расхода воды – на рис. 6, зависимость массового расхода воды от диаметра отверстия в шайбе – на рис. 7.

Таблица 1

Осредненные максимальные значения гидроудара
при различных диаметрах отверстия в шайбеThe averaged maximum values of the water hammering
at different diameters of hole in the washer

Диаметр отверстия d , мм	ΔP , дел	ΔP , бар	t , с	m , кг	G , кг/с
1,2	20	6,5	10,95	2,31	0,21
1,6	20	6,5	10,63	2,29	0,22
2,0	19	6,2	10,52	2,30	0,22
2,5	17	5,6	10,39	2,31	0,22
3,0	16	5,2	10,20	2,31	0,23
3,5	14	4,6	9,89	2,30	0,23
4,5	9	2,9	9,60	2,31	0,24

Примечание: ΔP – величина гидравлического удара; t – время заполнения установки; m – масса воды, слитой перед экспериментом (равна свободному объему емкости); $G = m/t$ – массовый расход воды.

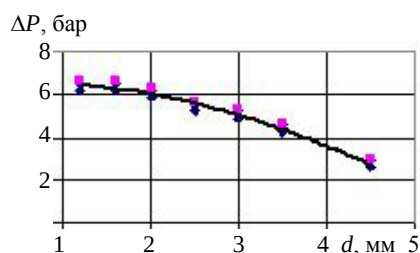


Рис. 5. Зависимость силы гидравлического удара от диаметра отверстия в пластине:

◆ – среднестатистические значения;
■ – максимальные значения

Fig. 5. The dependence of the intensity of the water hammering on the diameter of the hole in the plate:

◆ – average values; ■ – maximum values

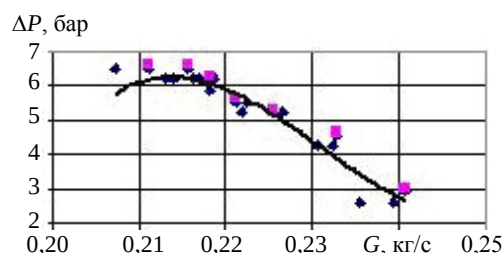


Рис. 6. Зависимость силы гидравлического удара от массового расхода воды, поступающей в емкость:

◆ – среднестатистические значения;
■ – максимальные значения

Fig. 6. The dependence of the intensity of the water hammering on the mass flow rate of water: ◆ – average values;

■ – maximum values

Графики на рис. 5, 7 показали ожидаемые результаты. Так, сила гидроудара растет с уменьшением диаметра отверстия (с увеличением перекрытия сечения потока), тогда как скорость подъема воды в баке, наоборот, падает с уменьшением диаметра выходного сечения. Интересными явились результаты графика на рис. 6, где замечен максимум величины гидроудара от скорости подъема уровня. Следует отметить, что подобные ситуации могут иметь место на реальных КД в случаях неполного подъема предохранительного клапана.

Для получения расчетного значения величины гидравлического удара воспользуемся соотношениями, полученными Н. Е. Жуковским [7]. Увеличение давления при гидравлическом ударе определяется в соответствии с его теорией по формуле

$$D_p = \rho(v_0 - v_1)c,$$

где D_p – величина гидроудара, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м³; v_0, v_1 – средняя скорость в трубопроводе до и после закрытия запорного клапана, м/с; c – скорость распространения ударной волны вдоль трубопровода, м/с.

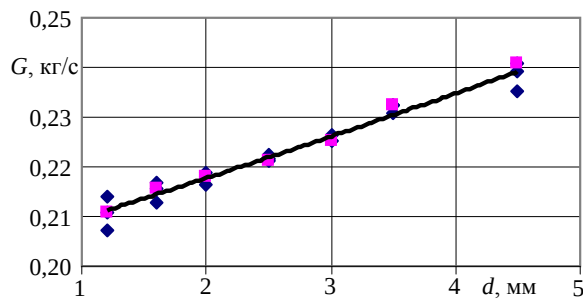


Рис. 7. Зависимость массового расхода воды от диаметра отверстия в шайбе:

◆ – среднестатистические значения; ■ – максимальные значения

Fig. 7. The dependence of the mass flow rate of water on the hole diameter in the washer:

◆ – average statistical values; ■ – maximum values

Н. Е. Жуковским было показано, что скорость распространения ударной волны c находится в прямо пропорциональной зависимости от сжимаемости жидкости, величины деформации стенок трубопровода, определяемой модулем упругости материала E , из которого он выполнен, а также от диаметра трубопровода. Также гидравлический удар имеет очень малые значения или может вообще не возникнуть в трубопроводе, содержащем пузырьки газа [8].

Для определения скорости ударной волны в экспериментальном баке воспользуемся следующим соотношением Н. Е. Жуковского для тонкостенных трубопроводов [7]:

$$C_u = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{E}{E_{tr}} \frac{D}{h} k}},$$

где C_u – скорость распространения ударной волны в трубопроводе, определяется по формуле; E – модуль объемной упругости жидкости; ρ – плотность жидкости;

$\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – скорость распространения звука в чистой жидкости;

E_{tr} – модуль упругости материала стенок трубы; D – диаметр трубы; h – толщина стенок трубы.

Для воды отношение $\frac{E}{E_{tr}}$ зависит от материала труб и может быть принято для стальных труб 0,01 [7].

Коэффициент k для тонкостенных трубопроводов (стальных, чугунных, полиэтиленовых) принимается равным 1.

Скорость звука в среде также зависит от температуры и давления в трубопроводе. По условиям эксперимента (давление $P_0 = 1,664$ кгс/см² и температура воды $t = 9$ °C) получим скорость звука в чистой воде [9]

$$\sqrt{\frac{E}{\rho}} = f(P_0, T) = 1442,9 \text{ м/с.}$$

Тогда скорость распространения гидравлического удара в экспериментальной емкости

$$C_u = 1442,9 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 0,01 \frac{0,149}{0,001}}} = \frac{1442,9}{\sqrt{2,49}} = 914,4 \text{ м/с.}$$

Скорость выхода жидкости из отверстия в пластине может быть рассчитана по закону истечения жидкости из сосуда под давлением. Это необходимо для определения скорости

$$v_1 = 0,6\sqrt{2P/\rho}.$$

В зависимости от диаметра отверстия в установленной пластине будет изменяться скорость v_1 согласно уравнению неразрывности

$$S_1 v_1 = S_{отв} v_{отв}.$$

Тогда скорость движения жидкости перед шайбой

$$v_1 = \frac{S_{отв} v_{отв}}{S_1}.$$

Учитывая, что верхняя часть КД – половина эллипсоида, рассчитаем ее объем [10]

$$V_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi b^2 a,$$

где a, b – полуоси эллипсоида.

Объем цилиндрической части емкости

$$V_{ц} = V_{общ} - V_3.$$

Тогда время заполнения цилиндрической части

$$t_{\text{ц}} = \frac{V_{\text{ц}} \rho}{G}.$$

Через площадь сечения цилиндрической части емкости найдем скорость движения воды в ней

$$v_{\text{ц}} = \frac{V_{\text{ц}}}{t_{\text{ц}} S_{\text{ц}}}.$$

Скорость движения воды на выходе эллиптической части оценим по уравнению неразрывности потока

$$S_0 v_0 = S_{\text{ц}} v_{\text{ц}}.$$

Откуда

$$v_0 = \frac{S_{\text{ц}} v_{\text{ц}}}{S_0}.$$

По полученным соотношениям построим график (рис. 8), который иллюстрирует хорошее качественное согласие в поведении зависимости величины гидроудара от диаметра шайбы.

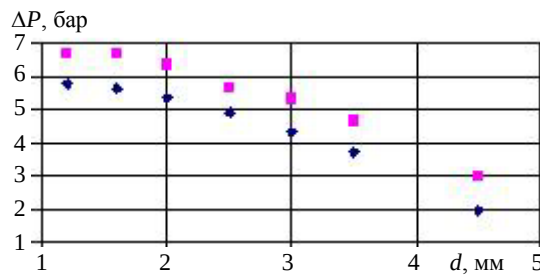


Рис. 8. Сравнение экспериментальных и расчетных значений:

◆ – расчет; ■ – эксперимент

Fig. 8. Comparison of experimental and calculated values:

◆ – calculation; ■ – experiment

Экспериментальный график проходит немного выше, чем расчетный. Вероятнее всего, причиной послужил неправильный подбор коэффициента жесткости системы, в частности при выборе $E_{\text{в}}$. Кроме того, бак имеет сварные швы, которые также повышают жесткость системы.

Для того чтобы показать характер ускорения потока воды при подъеме в эллиптическом днище, составим следующую модель.

Из уравнения для эллипса построим зависимость диаметра от высоты уровня [10]

$$x = a \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}},$$

где x – радиус сужения; y – высота уровня; a , b – малая и большая полуоси эллиптического днища.

Для оценки скорости в сужении возьмем случай из эксперимента, в котором скорость воды в цилиндрической части составила $v_1 = 0,011886$ м/с.

Из уравнения неразрывности потока получим

$$v_h = v_1 \frac{b^2}{a \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}}}.$$

Следует заметить, что это уравнение справедливо лишь для случая сужения эллиптической формы ($a = 0,031$ м). График разгона потока в таком случае будет иметь вид, как на рис. 9.

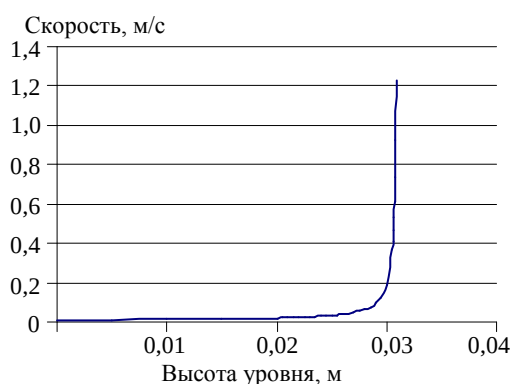


Рис. 9. Скорость воды в зависимости от высоты уровня в эллиптическом днище

Fig. 9. The velocity of the water depending on the height of level in an elliptic bottom

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально и теоретически показана возможность возникновения гидравлического удара при сужении выходного сечения бака, заполняемого водой, особенно в случае, когда перед жидкостью через это сужение протекал газ или пар.

2. Показано, что при полном заполнении объема компенсатора давлением теплоносителем появляется возможность возникновения гидравлического удара. Для устранения этого явления необходимо оставлять в компенсаторе давления минимальный объем паровой подушки, например ставить штуцер для предохранительного клапана не на вершине емкости, а ближе к краю, или заглублять этот штуцер ниже уровня эллиптической части бака.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тяжелые аварии на атомных станциях с корпусными ядерными реакторами. Основы моделирования и анализ / В. И. Скалозубов [и др.]. Одесса, 2015. 319 с.
2. Авария на АЭС Три-Майл-Айленд [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Авария_на_АЭС_Три-Майл-Айленд.

3. Емельянов, И. Я. Конструирование ядерных реакторов / И. Я. Емельянов, В. И. Михан, В. И. Солонин. М.: Энергоиздат, 1982. 390 с.
4. Сидоренко, В. А. Безопасность и надежность атомных электростанций / В. А. Сидоренко. М.: МЭИ, 1979. 312 с.
5. Филин, Н. В. Жидкостные криогенные системы / Н. В. Филин, А. Б. Буланов. Л.: Машиностроение, 1985. 247 с.
6. Королёв, А. В. Акустическая диагностика двухфазных потоков / А. В. Королёв // Труды Одесского национального политехнического университета. 2001. Вып. 3, № 15. С. 40–42.
7. Жуковский, Н. Е. О гидродинамическом ударе в водопроводных трубах / Н. Е. Жуковский. Л.: Гос. изд-во техн.-теор. лит-ры, 1949. 106 с.
8. Королёв, А. В. Анализ и моделирование теплоэнергетического оборудования, работающего с двухфазными течениями / А. В. Королёв. Одесса: Астропринт, 2010. 456 с.
9. Ривкин, С. Л. Термодинамические производные для воды и водяного пара / С. Л. Ривкин, А. А. Александров, Е. А. Кремлевская. М.: Энергия, 1977. 264 с.
10. Математический энциклопедический словарь / под ред. Ю. В. Прохорова. М.: Сов. энцикл., 1988. 847 с.

Поступила 01.03.2017 Подписана в печать 10.05.2017 Опубликовано онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Skalozubov V. I. [et al.] (2015) *Severe Accidents in Nuclear Power Plants Equipped with Freestanding Nuclear Reactors. The Fundamentals of Modelling and Analysis*. Odessa. 319 (in Russian).
2. Three Mile Island Accident. *Wikipedia. The Free Encyclopedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Three_Mile_Island_accident.
3. Emel'yanov I. Ya., Mikhhan V. I., Solonin V. I. (1982) *Design of Nuclear Reactors*. Moscow, Energoizdat Publ. 390 (in Russian).
4. Sidorenko V. A. (1979) *The Safety and Reliability of Nuclear Power Plants*. Moscow, Moscow Power Engineering Institute Publishing House. 312 (in Russian).
5. Filin N. V., Bulanov A. B. (1985) *Liquid Cryogenic Systems*. Leningrad, Mashinostroenie Publ. 247 (in Russian).
6. Korolev A. V. (2001) Acoustic Diagnostics of Two-Phase Flows. *Trudy Odesskogo Natsional'nogo Politekhnicheskogo Universiteta* [Proceedings of the Odessa National Polytechnic University], Is. 3 (15), 40–42 (in Russian).
7. Zhukovskii N. E. (1949) *On Hydrodynamic Shock in Water Pipes*. Leningrad, State Publishing House of Technical and Theoretical Literature. 106 (in Russian).
8. Korolev A. V. (2010) *Analysis and Modeling of Thermal-Power Equipment Operating with Two-Phase Flows*. Odessa, Astroprint Publ. 456 (in Russian).
9. Rivkin S. L., Aleksandrov A. A., Kremlevskaya E. A. (1977) *Thermodynamic Derivatives for Water and Steam*. Moscow, Energiya Publ. 264 (in Russian).
10. Prokhorov Yu. V. (ed.). (1988) *Mathematical Encyclopedic Dictionary*. Moscow, Sovetskaya Entsiklopediya Publ. 847 (in Russian).

Received: 1 March 2017 Accepted: 10 May 2017 Published online: 29 September 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-470-483

УДК 697:620

Использование воздушных прослоек в ограждениях зданий для энергосбережения при кондиционировании воздуха

С. Н. Осипов¹⁾, С. Л. Данилевский¹⁾, А. В. Захаренко¹⁾

¹⁾ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Поскольку в Беларуси нет крупных природных энергоресурсов, необходимо постоянно помнить об экономии энергии. В связи с этим важна разработка современных способов экономии при кондиционировании воздуха внутри новых зданий с воздушными прослойками в ограждениях, особенно в светопрозрачных. Предложена система вентиляции воздушных прослоек в ограждении здания, при которой движение воздуха происходит за счет гравитационных и аэродинамических сил, что позволяет дополнительно организовать естественный, принудительный или комбинированный воздухообмен. С целью увеличения и упорядочения естественной тяги используются перегородки, разделяющие разные части воздушных прослоек. Для естественного воздухообмена с использованием гравитационных сил применяются отверстия, выполненные в верхней и нижней частях перегородок между смежными зонами воздушных прослоек. Естественный воздухообмен в отверстиях перегородок регулируется подвижными заслонками, жалюзи или иными регулировочными устройствами. Для комбинированного или принудительного воздухообмена между смежными зонами воздушных прослоек используются вентиляторы с прокачкой воздуха из зон воздушных прослоек с более высокой температурой воздуха в зоны воздушных прослоек с более низкой температурой или наоборот. При принудительном воздухообмене для интенсификации проникновения воздуха в зоны воздушных прослоек применяют настилаемые на твердую поверхность струи. Для охлаждения многослойного ограждения здания, при котором естественным, принудительным или комбинированным путем создается движение воздуха между воздушными прослойками, образованными внутренними перегородками, осуществляется подача в эти прослойки части или всего отработанного внутри здания кондиционированного или некондиционированного (но более холодного по сравнению с наружным) воздуха. Комбинированная или принудительная подача отработанного внутри здания воздуха в воздушные прослойки производится посредством воздухопроводов, связанных с выводными каналами кондиционеров. При этом внутренние перегородки оборудуются воздушными клапанными отверстиями.

Ключевые слова: энергосбережение, кондиционирование воздуха, ограждение здания, воздушные прослойки, температура воздуха

Для цитирования: Осипов, С. Н. Использование воздушных прослоек в ограждениях зданий для энергосбережения при кондиционировании воздуха / С. Н. Осипов, С. Л. Данилевский, А. В. Захаренко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Т. 60, № 5. С. 470–483. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-470-483

Адрес для переписки

Осипов Сергей Николаевич
ГП «Институт жилища –
НИПТИС имени Атаева С. С.»
ул. Ф. Скорины, 15б,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

Address for correspondence

Osipov Sergey N.
UE “Institute of Housing –
NIPTIS named after Ataev S. S.”
15b F. Skoriny str.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

The Use of Air Layers in Building Envelopes for Energy Saving during Air Conditioning

S. N. Osipov¹⁾, S. L. Danilevskiy¹⁾, A. V. Zacharenko¹⁾

¹⁾UE “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Since there are no large natural energy resources in Belarus, energy savings ought to be a point of the special attention. With this regard it is important to develop modern ways of savings during the process of air conditioning inside new buildings with an air layer in the enclosure, especially in translucent ones. The system of ventilation of air layers in the enclosure of a building has been introduced in which air movement is caused by the gravitational and aerodynamic forces. It makes it possible to arrange further ventilation – a natural, forced or a hybrid one. With the purpose of increasing and streamlining natural draught the partitions are used separating the different parts of air layers. For natural ventilation with the use of gravitational forces the holes in the upper and lower parts of the partitions between adjacent air layers are applied. Natural ventilation in the holes of the partitions is regulated by movable shutters, blinds or other adjusting devices. For combined or forced air exchange between adjacent zones of air layers fans are used pumping air from the air layer zones with a higher temperature to zones of air layers with lower temperature and vice versa. When air exchange is forced, in order to intensify the infiltration of air into zones of air layers jets are laid on a hard surface. In order to cool a multi-layered enclosure of a building, where the movement of air between the air layers (that have been formed by internal partitions) is being fulfilled by a natural, forced or combined mode, a part of the air or the total air processed inside the building (i.e. conditioned or non-conditioned air cooler as compared with the outside one) is being sent to these strata. Combined or forced flow of the air processed inside the building into the air layers is done through the ducts associated with the output channels of the air conditioners. The internal partitions are equipped with the air valve hole.

Keywords: energy saving, air conditioning, enclosure of a building, air layers, air temperature

For citation: Osipov S. N., Danilevskiy S. L., Zacharenko A. V. (2017) The Use of Air Layers in Building Envelopes for Energy Saving during Air Conditioning. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (5), 470–483. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-470-483 (in Russian)

Анализ среднегодовых и среднеотопительных температур наружного атмосферного воздуха [1, 2] показывает [3], что за последние 25 лет эти температуры в Беларуси повысились примерно на 2 °С. Одновременно возрастают суточные перепады температур в ночное и дневное время. В летние периоды наблюдается повышение контрастности нагревания солнечных южных и западных сторон зданий, что требует существенного увеличения мощности кондиционеров и расхода электроэнергии.

В течение последних 30–40 лет во всем мире строятся высотные здания с обширным светопрозрачным ограждением, чему примером может служить Национальная библиотека Беларуси, построенная в 2004–2006 гг. в Минске. В таких строениях имеются особые условия кондиционирования воздуха, создаваемые в закрытых помещениях и поддерживаемые с помощью средств автоматического управления искусственного микроклимата [4, с. 218].

В нормативной документации для высотных зданий [5, с. 17–18] приведены особые требования к проектированию ограждающих конструкций,

которые должны отвечать требованиям безопасности, надежности и долговечности и иметь срок службы не менее 50 лет. Согласно ГОСТ 30494–96 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» и СанПиНам [6–8], наружные светопрозрачные ограждающие конструкции зданий должны обеспечить необходимые параметры микроклимата помещений, что способствует поиску новых конструктивных решений использования воздушных прослоек в ограждениях зданий и наружных светопрозрачных ограждениях [9, 10]. Наиболее известным конструктивным решением является вентилируемая воздушная прослойка [11, с. 179–185], температурно-влажностные параметры воздуха в которой в зависимости от вентиляции за счет гравитационных сил и ветра аналитически описаны с использованием известных физических законов.

Движение воздуха внутри воздушных прослоек и между ними при наличии сообщающихся каналов при естественной вентиляции происходит благодаря гравитационному давлению Δp , возникающему за счет разности плотностей воздуха, которые зависят от температуры [11, с. 184]:

$$\Delta p = (\rho_1 - \rho_2)gh = 49 \cdot 10^{-3}(t_2 - t_1)gh, \quad (1)$$

где Δp – гравитационное (так называемый естественный напор) давление, Па; ρ_1, ρ_2 – плотность воздуха при температурах t_1, t_2 , кг/м³; g – ускорение силы тяжести, м/с²; h – разность высот столбов воздуха с различной температурой или разность высот отверстий входа воздуха в прослойку и выхода из нее, м.

Как видно из (1), величина гравитационного давления прямо пропорциональна разности температур воздуха, которые являются основным фактором гравитационного (естественного) давления воздуха. Поэтому преимущество данного способа – это возможность использования расчета гравитационного режима вентиляции воздушных прослоек. Недостаток – отсутствие рассмотрения и анализа возможности организации и применения воздухообмена между отдельными воздушными прослойками с целью перекачки тепловой энергии с избыточных зон в дефицитные.

Известна теплоизоляция стен здания [12] в виде набора воздушных слоев, образованных натянутыми пленками, выполненными в виде полос, установленных подобно черепице, зазор между которыми обеспечен распорными элементами. Зазор между полотнами создается вертикальными вставками в виде реек толщиной 7–15 мм, а распорные элементы выполняются из капронового шнура диаметром 3–7 мм. Основным недостатком этого способа при определенных условиях является отсутствие теплообмена посредством воздухообмена между отдельными воздушными полостями.

Задача разработанного авторами статьи способа – экономия тепловых ресурсов и уменьшение неравномерности тепловых режимов с разных сторон здания в зависимости от интенсивности солнечного облучения и параметров ветра, а также устранение влияния неравномерности темпера-

тур различных участков наружной оболочки на прочностную надежность конструкций и целостность оболочки здания. Решается она достижением технического результата посредством вентиляции воздушных прослоек в ограждениях здания, при которой движение воздуха в прослойке осуществляется за счет гравитационных и аэродинамических сил. Также дополнительно организуется естественный, принудительный или комбинированный воздухообмен между, по меньшей мере, двумя зонами с отличающейся средней температурой воздуха в одной или в разных воздушных прослойках или между любой из упомянутых зон с окружающей атмосферой.

С целью обеспечения возрастания величины и упорядочения действия естественной тяги используются перегородки, разделяющие разные части воздушных прослоек. При организации естественного, принудительного или комбинированного воздухообмена в воздушных прослойках толщиной менее 0,05 м обеспечивается ламинарный режим движения воздуха в прослойках.

Для организации естественного воздухообмена с использованием гравитационных сил используются отверстия, достаточные для обеспечения необходимого естественного воздухообмена, выполненные в верхней и нижней частях перегородок между смежными зонами воздушных прослоек. Регулирование естественного воздухообмена в отверстиях перегородок осуществляется подвижными заслонками, жалюзи или иными регулирующими устройствами.

При комбинированном или принудительном воздухообмене между смежными зонами воздушных прослоек применяются вентиляторы с прокачкой воздуха из зон воздушных прослоек с более высокой температурой воздуха в зоны воздушных прослоек с более низкой температурой или наоборот. В случае принудительного воздухообмена для интенсификации проникновения воздуха в зоны воздушных прослоек используются нагнетательные струи на твердые поверхности.

Сущность предлагаемого способа вентиляции воздушных прослоек в ограждениях зданий заключается в том, что подвижность воздуха в прослойке, которая обычно происходит за счет гравитационных сил, возникающих под действием разности температур и, следовательно, плотностей воздуха в прослойке и на том же уровне за ее пределами в столбе воздуха высотой, равной вертикальному расстоянию между уровнями сообщающихся сосудов, используется для воздухообмена между различными зонами – частями воздушных прослоек ограждений здания или с окружающей атмосферой с разными температурами воздуха. При этом для сглаживания неравномерности тепловых режимов в различных частях воздушных прослоек (на солнце и в тени) можно использовать как естественную тягу, так и принудительную вентиляцию с применением вентиляционных установок, а также комбинированный воздухообмен с одновременной естественной и механической тягой. Такой обмен воздушными массами с различной температурой позволяет значительную часть солнечного тепла, ассимили-

рованного воздухом прослойки на солнечной стороне здания, использовать для повышения температуры воздуха в прослойке на теневой стороне.

Для вентиляции воздушных прослоек в ограждениях зданий предпочтительна организация воздухообмена, основанного на разности температуры внутри прослоек в таких ограждениях и окружающей атмосферы. В качестве примера различия температур в воздушных прослойках на солнечной и теневой сторонах здания можно взять результаты натурных измерений в ограждающих конструкциях здания Национальной библиотеки Беларуси в октябре 2005 г. На юго-западной стороне на расстоянии примерно 10 м по вертикали от начала вертикальной поверхности стекла и на расстоянии 10 м от ребра между южной и юго-западной вертикальными гранями книгохранилища 11–12 октября 2005 г. при температуре наружного воздуха $T_n \approx (15–16)^\circ\text{C}$ температура воздуха в середине воздушной прослойки достигала $T_{vp1} \approx 22^\circ\text{C}$, а температуры ограждающих поверхностей воздушной прослойки $T_1(T_2) \approx (30–37)^\circ\text{C}$ (рис. 1).

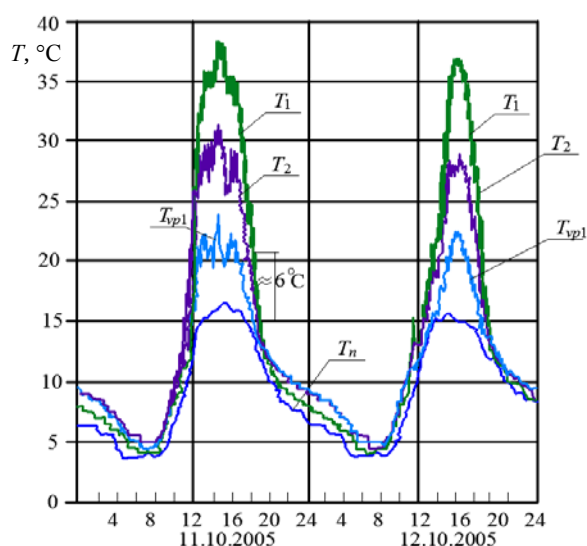


Рис. 1. Зависимости температур воздуха и поверхностей ограждения на юго-западной стороне книгохранилища библиотеки от времени суток за период 11–12 октября 2005 г.:

T_n – температура наружного воздуха; T_1 – температура внутренней поверхности стекла;
 T_2 – температура наружной поверхности листа алюминия; T_{vp1} – температура воздуха между стеклом и алюминиевой стенкой на высоте 10 м от входа воздуха

Fig. 1. Dependencies of the temperatures of the air and surfaces of the enclosure at the southwest side of the book depositary on the time of day and night during the period of October 11–12, 2005:

T_n – ambient air temperature; T_1 – temperature of the inner glass surface;
 T_2 – temperature of the outer surface of the aluminum plate; T_{vp1} – temperature of air between the glass and the aluminum wall at a height of 10 m from the intake of air

Такое уменьшение температуры воздуха в середине воздушной прослойки по сравнению с ограждающими поверхностями явилось следствием интенсивной вентиляции воздушной прослойки со средней скоростью 0,5 м/с

за счет естественной тяги, образовавшейся вследствие разности температур наружного воздуха T_n и внутри воздушной прослойки T_{vp1} при свободном доступе из-за неполного остекления наружной поверхности здания в смежных частях. Однако даже при такой достаточно интенсивной вентиляции разница в температурах в воздушных прослойках на уровне 10 м по вертикали от начала вертикальной поверхности стекла на солнечной стороне и в тени составила $22 - 16 \approx 6$ °С, а температура алюминиевой стенки достигала 30 °С. С учетом градиента роста температуры в воздушной прослойке около 0,6 °С/м возможная температура воздуха у верхней границы воздушной прослойки составит примерно 30 °С, а температура алюминиевой стенки может превысить 35 °С, что потребует кондиционирования воздуха в коридоре, окружающем книгохранилище. В это самое время температура внутренней поверхности всей многослойной наружной стены с теневой стороны опустилась до 15 °С, что является нижним допустимым пределом для предотвращения конденсации влаги.

В случае прекращения интенсивной вентиляции воздушной прослойки разница температур алюминиевой перегородки на солнечной T_{2c} и теневой $T_{2т}$ сторонах может достигать $45 - 15 \approx 30$ °С, что при протяженности периметра около 150 м способно дать деформацию около $(30/2) \cdot 0,238 \cdot 10^{-4} \cdot 150 \approx 0,054$ м $\approx 5,4$ см. Хотя такая деформация значительно меньше разрушающей, она может сказаться на состоянии технологических отверстий и других элементов конструкции. Поэтому дополнительная организация воздухообмена между различными частями воздушных прослоек или с окружающей атмосферой с разными температурами воздуха позволяет при определенных условиях не только уменьшить затраты на отопление и кондиционирование воздуха, но и снизить неравномерность температурных деформаций различных частей здания.

Для организации воздухообмена между различными частями воздушных прослоек и использования эффекта естественной тяги, что позволяет обойтись без специальных вентиляторов и экономить энергоресурсы, в определенных (расчетных) местах воздушных прослоек необходимо устраивать преимущественно вертикальные воздухопроницаемые перегородки, разделяющие зоны с отличающейся средней температурой воздуха. При этом вследствие организации процессов тепломассообмена происходит возрастание величины и упорядочение действия естественной тяги [13, 14].

Для повышения интенсивности воздухообмена между различными частями воздушных прослоек большое значение имеет режим движения воздуха как в самих прослойках, так и между ними, в том числе и между зонами с разной температурой воздуха. Как известно, при ламинарном режиме движения воздуха его расход (дебит) прямо пропорционален величине перепада давлений, который при естественном конвективном движении также прямо пропорционален перепаду температур. В случае турбулентного режима движения воздуха в прослойке расход воздуха в поперечном сечении пропорционален лишь корню квадратному из перепада давле-

ний. Для создания ламинарного режима движения в полости нужно не только обеспечивать общую величину критерия Рейнольдса $Re < 2300$, но и ламинарный режим возможной свободной конвекции в прослойке, для чего можно использовать рекомендации, приведенные в [15, 16]. При ламинарной свободной конвекции в прослойке, заполненной воздухом (критерий Прандтля $Pr = 0,71$), при $H/B = 1,25-20,0$ (H, B – высота и толщина прослойки) и критерии Релея $Ra_B = (1,94 \cdot 10^3) - (2,3 \cdot 10^5)$ максимальная температура в центре изменяется по линейному закону. Ламинарный режим в прослойке с линейным распределением температуры между нагретыми стенками имеет место при $Ra_B < 5 \cdot 10^3$. С учетом $Ra = Gr \cdot Pr$ (Gr – критерий Грасгофа) можно рассчитать условия соблюдения ламинарного режима.

Как показывают расчеты, ламинарный режим достаточно быстрого движения воздуха ($v \approx 0,35$ м/с), обеспечивающий существенный теплообмен с нагретыми поверхностями стенок [11], наступает при $B \leq 0,05$ м. При увеличении толщины прослойки и $Re \leq 2300$ теплообмен уменьшается, а вероятность турбулизации потока увеличивается.

Учитывая прямую пропорциональность величины естественной тяги от перепада уровней расположения нижнего и верхнего краев отдельных отверстий, через которые сообщаются различные зоны воздушных прослоек с разными средними температурами воздуха, эти отверстия устраивают таким образом, чтобы перепад уровней действия естественной тяги был наибольшим, что позволяет обеспечить максимально возможный в данных условиях воздухообмен. Для регулирования величины воздухообмена специальные отверстия необходимо оборудовать подвижными воздушными заслонками, жалюзийными или иными устройствами, так как параметры воздуха в различных прослойках могут сильно изменяться (рис. 1).

Зачастую для обеспечения нужного объема воздухообмена между различными прослойками только естественной тяги бывает недостаточно, и тогда специальные отверстия следует оборудовать низконапорными (обычно не более 100 Па) вентиляторами. Однако необходимая производительность таких вентиляторов может оказаться достаточно большой. Так, для обеспечения средней скорости движения воздуха 0,5 м/с в условиях описанной ранее воздушной прослойки вокруг книгохранилища Национальной библиотеки Беларуси расход воздуха через эту прослойку должен составлять $Q = 1,2 \cdot 20 \cdot 0,5 = 12$ м³/с = 43200 м³/ч. При организации воздухообмена через две боковые перегородки прослойки производительность каждого вентилятора должна быть около 22000 м³/ч, что, например, характерно для вентилятора типа ВРКА-ВДУ-3 с двигателем 112МВ8, потребляющим мощность 3 кВт. Установочные размеры вентилятора, смонтированного в квадратной монтажной обечайке 970×970 мм, позволяют размещать его в перегородке шириной 1200 мм.

При наличии весьма протяженных воздушных прослоек для организации активного принудительного или комбинированного воздухообмена

в пределах отдельных участков прослоек необходимо применять воздуховоды для обеспечения направленности и предельного увеличения дальнобойности создаваемых вентиляторами воздушных струй. В этом случае представляется целесообразным использовать поверхностный эффект (эффект Коанды) своеобразного «прилипания» настилаемой на твердую поверхность струи, в результате чего дальнобойность увеличивается примерно в 1,4 раза.

Для рассматриваемого примера (Национальная библиотека, 11.10.2005) в доказательство возможной технико-экономической эффективности с использованием вышеуказанных средств (в любом их сочетании) посредством перекачки воздуха с 12:00 до 18:00 ч был организован воздухообмен из зоны с более нагретым воздухом в прослойке на солнечной стороне библиотеки в зону более холодного воздуха в прослойке на теневой стороне – около $2,5 \cdot 10^6$ кДж теплоты. Исходными данными для расчета указанного количества теплоты при такой перекачке воздуха были (рис. 1): перепад температур воздуха в соответствующих зонах воздушных прослоек $\Delta t = 26 - 16 \approx 10$ °C; скорость движения воздуха в прослойке $v \approx 0,4$ м/с; площадь поперечного сечения прослойки $S = 20 \cdot 1,2 = 24$ м²; плотность воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³; удельная теплоемкость воздуха $c_p = 1$ кДж/(кг·град.). Тогда количество теплоты q , переносимой воздухом за время $\tau = 6$ ч (с 12:00 до 18:00 ч), или 21600 с, составит $q = \rho c_p \Delta t v \tau S = 1,2 \cdot 1 \cdot 10 \cdot 0,4 \times 21600 \cdot 24 \approx 2,5 \cdot 10^6$ кДж $\approx 6 \cdot 10^5$ ккал, а это достаточно большое значение. Возможная максимальная часовая перекачка количества теплоты $q_{\max}$ с нагретым воздухом при $\Delta t = 12$ °C и $v = 0,5$ м/с составит: $q_{\max} = 1,2 \cdot 1 \times 12 \cdot 0,5 \cdot 3600 \cdot 24 \approx 6,2 \cdot 10^5$ кДж/ч $\approx 1,7 \cdot 10^5$ Вт/ч ≈ 170 кВт/ч. При этом не следует забывать, что исходные данные являются экспериментальными, которые получены в г. Минске 11 октября 2005 г.

Для варианта охлаждения многослойного ограждения здания для сравнения выбрали способ [9] с дополнительно организуемым естественным, принудительным или комбинированным воздухообменом, по меньшей мере, между двумя зонами (с отличающейся средней температурой воздуха в одной или разных воздушных прослойках или между любой из упомянутых зон) с окружающей атмосферой. Недостатком этого способа является использование только разницы температур воздуха между воздушными прослойками в ограждении здания или в любой из воздушных прослоек и окружающей атмосферой, что для целей кондиционирования здания пригодно лишь частично в случае температуры используемого воздуха не выше нормативной (до $t_n = 25$ °C) [14]. При $t_n > 25$ °C использование наружного воздуха может оказаться рациональным только для частичного охлаждения солнечной стороны здания, что ограничивает применение этого способа.

Задачи предлагаемого варианта охлаждения – это экономия электроэнергии, расходуемой на кондиционирование воздуха, и уменьшение неравномерности тепловых режимов ограждения здания, влияющих на прочностную надежность его конструкций и целостность оболочки. Решается

она достижением технического результата посредством предлагаемого способа, при котором происходит движение воздуха в промежутках между слоями ограждения здания за счет гравитационных и аэродинамических сил с управляемым воздухообменом между, по меньшей мере, двумя зонами и (или) наружной атмосферой. Согласно выбранной методике, в воздушные прослойки в ограждении здания естественным, принудительным или комбинированным путем подается часть или весь отработанный внутри здания более холодный внутренний воздух, температура которого ниже температуры наружного атмосферного воздуха.

Для организации комбинированной или принудительной подачи отработанного внутри здания воздуха в воздушные прослойки используют превышение давления воздуха внутри здания за счет принудительной подачи кондиционированного воздуха. При смешивании в прослойках воздуха из внутренних помещений с наружным атмосферным воздухом подача воздушной смеси в прослойку осуществляется в соотношении, обеспечивающем такие температуры смеси $T_{см}$ отработанного внутреннего и наружного воздуха в прослойке и T_3 на поверхности прилегающей стены, что их соотношение к T_k (температура воздуха в объеме воздушной прослойки и поверхности стены, при которой начинается конденсация влаги) в соответствии со средней влажностью воздуха исключает конденсатообразование в промежутках между слоями ограждения здания. Внутренние перегородки между воздушной прослойкой и кондиционируемым объемом оборудуются воздушными клапанными отверстиями.

Вертикальный разрез ограждающих конструкций здания с нанесенными точками измерений температур приведен на рис. 2. Подобный разрез имеет верхняя главная часть здания Национальной библиотеки Беларуси.

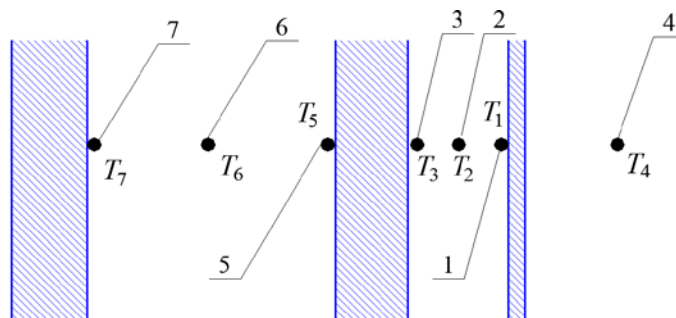


Рис. 2. Вертикальный разрез ограждающих конструкций здания: T_1 – T_7 – температура; 1 – внутренняя поверхность наружного стекла с T_1 ; 2 – воздушная прослойка (с T_2 воздуха) между наружным стеклом и наружной стеной; 3 – наружная поверхность (с T_3) наружной стены; 4 – наружный атмосферный воздух с T_4 ; 5 – внутренняя поверхность (с T_5) наружной стены; 6 – внутренний воздух помещения с T_6 ; 7 – поверхность внутренней стены с T_7

Fig. 2. Vertical section of the building envelope: T_1 – T_7 – temperature; 1 – inner surface of the outer glass with T_1 ; 2 – air layer (with T_2 of air) between the outer glass and the outer wall; 3 – outer surface (with T_3) of the outer wall; 4 – outer atmospheric air with T_4 ; 5 – inner surface (with T_5) exterior walls; 6 – indoor air with T_6 ; 7 – internal surface of the wall with T_7

Суть излагаемого способа охлаждения заключается в том, что в воздушные прослойки в ограждении здания естественным, принудительным или комбинированным путем из внутренних помещений подается часть или весь отработанный внутри здания, кондиционированный или нет (но более холодный по сравнению с наружной атмосферой) внутренний воздух. Принудительная подача отработанного кондиционированного воздуха (за счет некоторого превышения его давления) из помещений внутри здания в воздушные прослойки (через специально оборудованные в них клапанные отверстия) производится посредством воздухопроводов, связанных с выводными каналами кондиционеров. При этом соблюдается условие $T_6 < T_4$.

Обустройство клапанных отверстий возможно любым известным технически приемлемым способом. Конструкция воздушных прослоек в ограждении здания может обеспечивать принудительное либо естественное поступление наружного воздуха в прослойку из атмосферы по заданным проектом условиям.

В случае одновременной подачи в воздушные прослойки из помещений внутри здания отработанного кондиционированного относительно холодного воздуха температурой T_6 и наружного теплого влажного воздуха температурой T_4 результирующая температура подаваемой в прослойку воздушной смеси может оказаться ниже температуры начала конденсации влаги в объеме воздушной прослойки T_2 и температуры на наружной поверхности прилегающей наружной стены T_3 , что может привести к выпадению влаги и повышенной коррозии. Поэтому необходимо регулировать интенсивность поступления в воздушные прослойки влажного атмосферного воздуха.

Подачу воздушной смеси в прослойку осуществляют в соотношении, обеспечивающем температуры смеси $T_{см}$ отработанного внутреннего и наружного воздуха в прослойке и T_3 на поверхности прилегающей стены выше температуры конденсации влаги T_k в соответствии со средней влажностью по зависимости $T_{см} > T_k$. Температуры начала конденсации влаги T_k определяются по диаграмме $i-d$ по относительной влажности воздуха.

Для охлаждения ограждений здания за счет перемещения отработанного кондиционированного воздуха из внутренних помещений в воздушные прослойки предпочтительна организация воздухообмена, основанного на разнице температур внутри здания и в воздушных промежутках его ограждений от температуры окружающей атмосферы. В качестве примера суточной динамики температур (в течение трех летних суток) в местах, обозначенных на рис. 2, приведем результаты натурных измерений в зоне вертикального ограждения верхней части Национальной библиотеки Беларуси (рис. 3).

Как видно из рис. 3, в климатических условиях Беларуси в летний период суточные колебания температуры атмосферного наружного воздуха T_4 достигают 15 °С, при этом колебания температуры внутренней поверхности наружного специального стекла на солнечной стороне достигают 30 °С (от 13 до 43 °С). Температура воздуха в промежутке между

стеклом и стеной T_2 (в воздушной прослойке) может достичь $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура поверхности стены $T_3 - 35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура наружного воздуха T_4 за время наблюдений к 12–14 часам каждого суток достигала $26\text{--}27\text{ }^{\circ}\text{C}$, что выше принятого верхнего нормативного температурного предела ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Поэтому температура воздуха и стен помещений внутри здания без значительных тепlopоступлений может поддерживаться при $(T_5 - T_7) < 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ за счет аккумуляции холода в ночной и утренний периоды, когда температура наружного воздуха $T_4 < 25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для уменьшения нагревания ограждающих конструкций от солнечного излучения для температурных условий, приведенных на рис. 3, достаточно пропускать наружный воздух с $T_4 = (25\text{--}27)\text{ }^{\circ}\text{C}$ через воздушный промежуток с $T_2 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ без вентиляции. В этом случае при достаточно интенсивном воздухообмене температура воздуха T_2 и поверхности стены T_3 может опуститься до $30\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$, что снизит предельную температуру внутри здания ($T_5 - T_7$) до $23\text{--}24\text{ }^{\circ}\text{C}$ и создаст вполне нормальные условия.

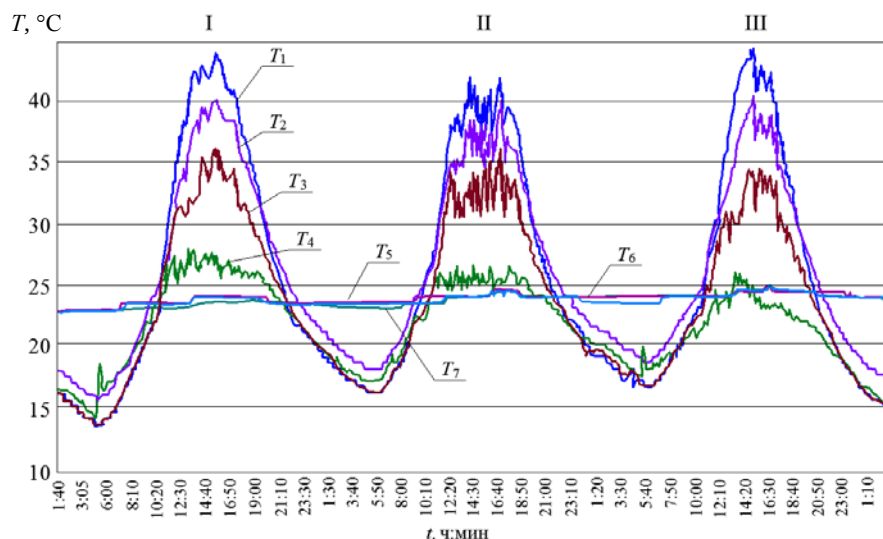


Рис. 3. Результаты натурных измерений температур в точках, указанных на рис. 2, в зоне вертикального ограждения верхней части Национальной библиотеки в летнее время

Fig. 3. The results of field measurements of temperatures at points shown in fig. 2, in the area of the vertical walls of the upper part of the National library in the summer

Однако подача внутреннего воздуха при $T_6 = (23\text{--}24)\text{ }^{\circ}\text{C}$ в воздушную прослойку позволяет уменьшить T_2 и T_3 до $27\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$, что дает возможность снизить T_6 до $22\text{--}23\text{ }^{\circ}\text{C}$ и соответствует комфортным условиям для работы. Этот эффект подачи отработанного кондиционированного воздуха из внутренних помещений в воздушные прослойки для их охлаждения особенно заметен при $T_4 > 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ в дневное и $T_4 > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ в ночное время суток, что исключает достаточное естественное охлаждение здания ночью. Использование наружного воздуха в дневное время приводит к недостаточному охлаждению освещенных солнцем воздушных прослоек. Как показывают

расчеты, аналогичные приведенным в [4], использование подачи внутреннего отработанного кондиционированного воздуха температурой $T_6 = (23-24)^\circ\text{C}$ в воздушные промежутки солнечной стороны с последующим выбросом в атмосферу позволяет существенно снизить температуру (например, с 50 до 30 $^\circ\text{C}$) поверхности наружной стены T_5 и уменьшить расход холода на кондиционирование здания до 20 %.

Необходимо заметить, что последние результаты исследований Л. В. Боруховой и А. С. Шибеко [17] дают возможность уточнить расчеты тепловых и аэродинамических режимов воздушных прослоек в светопрозрачных ограждениях зданий.

ВЫВОДЫ

1. Предложена система вентиляции воздушных прослоек в ограждении здания, при которой создается движение воздуха в прослойках за счет гравитационных и аэродинамических сил, что позволяет дополнительно организовать естественный, принудительный или комбинированный воздухообмен между, по меньшей мере, двумя зонами (с отличающейся средней температурой воздуха в одной или разных воздушных прослойках или между любой из упомянутых зон) с окружающей атмосферой. При этом для обеспечения возрастания величины и упорядочения действия естественной тяги используются перегородки, разделяющие разные части воздушных прослоек.

2. В случае естественного, принудительного или комбинированного воздухообмена в воздушных прослойках толщиной менее 0,05 м в них обеспечивается ламинарный режим движения воздуха. Для организации естественного воздухообмена с использованием гравитационных сил используются отверстия, достаточные для необходимого естественного воздухообмена, выполненные в верхней и нижней частях перегородок между смежными зонами воздушных прослоек.

3. Естественный воздухообмен в отверстиях перегородок регулируется подвижными заслонками, жалюзи или иными регулировочными устройствами, а для комбинированного или принудительного воздухообмена между смежными зонами воздушных прослоек применяются вентиляторы с прокачкой воздуха из зон воздушных прослоек с более высокой температурой воздуха в зоны воздушных прослоек с более низкой температурой или наоборот.

4. При организации принудительного воздухообмена для интенсификации проникновения воздуха в зоны воздушных прослоек используются настилаемые на твердые поверхности струи.

5. Для охлаждения многослойного ограждения здания, при котором естественным, принудительным или комбинированным путем организуется движение воздуха между, по меньшей мере, двумя воздушными прослойками (образованными внутренними перегородками многослойного

ограждения здания), осуществляется подача в воздушные прослойки части или всего отработанного внутри здания кондиционированного или некондиционированного (но более холодного по сравнению с наружным воздухом) воздуха.

6. Комбинированная или принудительная подача отработанного внутри здания воздуха в воздушные прослойки осуществляется также посредством воздуховодов, связанных с выводящими каналами кондиционеров здания. При этом внутренние перегородки оборудуют воздушными клапанными отверстиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Строительная климатология / Научно-исследовательский институт строительной физики (НИИСФ). М.: Стройиздат, 1990. 89 с. (Справочное пособие к СНиП).
2. Строительная климатология: СНБ 2.04.02–2000 (изм. № 1). Введ. 01.07.2001. Минск: Минстройархитектуры, 2007. 35 с.
3. Осипов, С. Н. О некоторых особенностях энергоснабжения жилых зданий в отопительный период / С. Н. Осипов, В. М. Пилипенко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 1. С. 77–96. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-77-96.
4. Большой строительный терминологический словарь-справочник: официальные и неофициальные термины и определения в строительстве, архитектуре, градостроительстве и строительной технике / Составители: В. Д. Наумов [и др.]; под ред. Ю. В. Феофилова. Минск: Минсктиппроект, 2008. 811 с.
5. Высотные здания. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.02-108–2008 (02250). Введ. 01.12.2008. Минск: Минстройархитектуры, 2008. 89 с.
6. Гигиенические требования к устройству, оборудованию и содержанию жилых домов [Электронный ресурс]: Санитарные нормы, правила и гигиенические нормативы: утв. М-вом здравоохранения Респ. Беларусь 20.08.2015, № 95. Режим доступа: <http://rcheph.by/dokumenty/sanitarnye-normy-i-pravila/kommunalnaya-gigiena/5644.html>. Дата доступа: 01.03.2017.
7. Гигиенические требования к проектированию, содержанию и эксплуатации производственных предприятий [Электронный ресурс]: СанПиН 2.2.1.13–5–2006: утв. Гл. гос. санитар. врачом Респ. Беларусь 03.04.2006, № 40. Режим доступа: <https://refdb.ru/look/1574181.html>. Дата доступа: 01.03.2017.
8. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений: СанПиН 9–80 РБ 98: утв. Гл. гос. санитар. врачом Респ. Беларусь 25.03.99: взамен СанПиН РБ № 11–13–94: введ. 25.03.99 // Гигиена труда. Вып. 1. Минск, 2008. С. 3–18.
9. Способ вентиляции воздушных прослоек в ограждениях зданий: Евразийский пат. № 012719/ С. Н. Осипов, С. Л. Данилевский. Опубл. 30.12.2009.
10. Способ охлаждения многослойного ограждения здания: пат. 18617 Респ. Беларусь / С. Н. Осипов, С. Л. Данилевский; дата публ.: 30.10.2014.
11. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика / В. Н. Богословский. М.: Высш. шк., 1982. 416 с.
12. Теплоизоляция стен здания: пат. 2176708 Рос. Федерации / Р. Н. Яковлев; дата публ.: 10.12.2001.
13. Остроумов, Г. А. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи / Г. А. Остроумов. Л.-М.: Гос. изд. техн.-теорет. лит., 1952. 256 с.
14. Джалурия, Й. Естественная конвекция: тепло- и массообмен / Й. Джалурия, пер. с англ. С. Л. Вишневецкого; под ред. В. И. Полежаева. М.: Мир, 1983. 399 с.
15. Мартыненко, О. Г. Свободно-конвективный теплообмен: справочник / О. Г. Мартыненко, Ю. А. Соковишин. Минск: Наука и техника, 1982. 398 с.

16. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: СНБ 4.02.01–03. Введ. 01.01.2005. Минск: Минстройархитектуры, 2015. 81 с.
17. Борухова, Л. В. Совершенствование методики расчета теплопоступлений через светопрозрачные конструкции и рекомендации по их уменьшению / Л. В. Борухова, А. С. Шибeko // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 1. С. 65–78. DOI:10.21122/1029-7448-2016-59-1-65-78

Поступила 12.01.2017 Подписана в печать 17.03.2017 Опубликовано онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Research Institute for Building Physics (1990) Building Climatology. Handbook to the SNiP. Moscow, Stroyizdat. 89 (in Russian).
2. Alteration No 1 of Building Code 2.04.02–2000. Civil Engineering Climatology. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2007. 35 (in Russian).
3. Osipov S. N., Pilipenko V. M. (2017) Some Features of the Power Supply of Residential Buildings during the Heating Season. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (1), 77–96 (in Russian). DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-77-96.
4. Naumov V. D., Alyavdina T. I., Bedula N. V., Zholid' A. S., Zholid' T. V., Poslova T. G., Feofilova Yu. Yu., Frolova T. S. (2008) *Large Construction Terminology Dictionary: Official and Unofficial Terms and Definitions in Construction, Architecture, Urban Planning and Construction Technology*. Minsk, Minskiproekt. 811 (in Russian).
5. TCP 45-3.02-108–2008 (02250). High-Rise Buildings: Building Design Standards (2008). Minsk: Ministry of Architecture and Construction. 89 (in Russian).
6. Sanitary Regulations and Norms of the Republic of Belarus. Hygienic Requirements to the Device, Equipment and Maintenance of Houses. Available at: <http://rcheph.by/dokumenty/sanitarnye-normy-i-pravila/kommunalnaya-gigiena/5644.html>. (Accessed 1 March 2017) (in Russian).
7. SanPiN (Sanitary Regulations and Norms) of the Republic of Belarus 2.2.1.13-5–2006. Hygiene Requirements for the Design, Maintenance and Operation of Industrial Enterprises. Available at: <https://refdb.ru/look/1574181.html>. (Accessing 1 March 2017) (in Russian).
8. SanPiN (Sanitary Regulations and Norms) of the Republic of Belarus No 11-13–94. Sanitary Regulations of Microclimate of Industrial Premises. *Occupational Health. Issue 1*. Minsk, 2008. 3–18 (in Russian).
9. Osipov S. N., Danilevsky S. L. (2009) *The Method of Ventilation of Air Layers in the Building Envelopes*. Eurasian Patent No 012719 (in Russian).
10. Osipov S. N., Danilevsky S. L. (2014) *Method of Cooling Multilayer Fencing of the Building*. Patent Republic of Belarus No 18617 (in Russian).
11. Bogoslovski V. N. (1982) *Civil Engineering Thermophysics*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 416 (in Russian).
12. Yakovlev R. N. (2001) *Thermal Insulation of Walls of the Building*. Patent Russia No 2176708 (in Russian).
13. Ostroumov G. A. (1952) *Free Convection in an Internal Task*. Leningrad-Moscow: State Publ. of Scientific-and-Theoretical Literature. 256 (in Russian).
14. Jaluria Y. (1980) *Natural Convection: Heat and Mass Transfer*. NY, Pergamon Press (Russ. ed.: *Estestvennaya Konvektsiya: Teplo- i Massoobmen*. Moscow, Mir Publ. 399).
15. Martynenko O. G., Sokovishin Yu. A. (1982) *Free-Convective Heat Transfer*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 398 (in Russian).
16. Building Code 4.02.01–03. Heating, Ventilation and Air Conditioning. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2015. 81 (in Russian).
17. Boroukhova L. V., Shybeka A. S. (2016) Improvement of Calculation Methods of Heat Input Through Translucent Structures and Recommendations for their Reduction. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (1), 65–78 (in Russian). DOI:10.21122/1029-7448-2016-59-1-65-78.

Received: 12 January 2017 Accepted: 17 March 2017 Published online: 28 September 2017

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-484-492

УДК 621.182.12.001.2.008

О новой технологии подготовки горячей питьевой воды

М. Ф. Джалилов¹⁾, М. М. Азимова¹⁾, А. М. Джалилова¹⁾

¹⁾Азербайджанский архитектурно-строительный университет (Баку, Азербайджанская Республика)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. В статье приводятся сведения о новой технологии Cl-анионирования при подготовке горячей питьевой воды. Указанная технология в отличие от умягчения воды, где все соли жесткости замещаются в катионите катионами натрия, позволяет заменить накипеобразующие HCO_3^- и SO_4^{2-} -анионы в сильноосновном анионите Cl^- -ионами. В результате предотвращается образование накипи на поверхностях нагрева подогревателей горячего водоснабжения. Таким образом, ценные для человеческого организма катионы жесткости остаются в составе воды, и ее качество удовлетворяет качеству питьевой воды. Учитывая важную роль кальция и магния для человеческого организма, в Германии и Турции ограничивается минимальное значение катионов жесткости в питьевой воде соответственно до 2,85 и 7,50 мг-экв/л. По данным Всемирной организации здравоохранения, в составе питьевой воды концентрация катионов магния и кальция рекомендуется соответственно в пределах 10–(20–30) и 20–50 мг/л; минимальное значение общей жесткости 2–4 мг-экв/л. Согласно разработанной технологии питьевая вода последовательно в направлении сверху вниз пропускается через механический и хлор-анионитный фильтры. В последнем основная часть HCO_3^- и SO_4^{2-} -ионов воды обменивается на Cl-анионы анионита. Далее вода собирается в бак, откуда насосом через аппарат ультрафиолетовой дезинфекции подается в подогреватель горячего водоснабжения. После истощения анионита SO_4^{2-} и HCO_3^- -анионами осуществляется его регенерация раствором (8–12)%-й NaCl. Излагаются результаты исследований анионитами Purolite A200EMBCl и AB-17-8. Отмечается, что при удельном расходе соли на регенерацию около 45–55 кг/м³ рабочая обменная емкость A200EMBCl получается в пределах 300–370 г-экв/м³. При анионировании воды остаточная концентрация HCO_3^- -ионов изменялась в пределах от 0,5 до 3,2 мг-экв/л. Средняя концентрация этих анионов при исходном их значении, равном 4,4 мг-экв/л, получилась в пределах от 1,8 до 2,2 мг-экв/л.

Ключевые слова: технология, Cl-анионирование, питьевая вода, обменная емкость, удельный расход, расход соли, регенерация, очистка, анионит, катионы жесткости, бикарбонат-ионы, качество воды, H-катионирование, умягчение, концентрация

Для цитирования: Джалилов, М. Ф. О новой технологии подготовки горячей питьевой воды / М. Ф. Джалилов, М. М. Азимова, А. М. Джалилова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 5. С. 484–492. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-484-492

Адрес для переписки

Джалилов Мардан Фарадж оглы
Азербайджанский архитектурно-строительный университет
ул. А. Султановой, 5,
AZ1073, г. Баку, Азербайджанская Республика
Тел.: +99 412 454-47-25
jalilovm@rambler.ru

Address for correspondence

Jalilov Mardan F.
Azerbaijan University of Architecture
and Construction
5 A. Sultanovoy str.,
AZ1073, Baku, the Azerbaijani Republic
Tel.: +99 412 454-47-25
jalilovm@rambler.ru

On a New Technology of Preparation of Hot Drinking Water

M. F. Jalilov¹⁾, M. M. Azimova¹⁾, A. M. Jalilova¹⁾

¹⁾Azerbaijan University of Architecture and Construction (Baku, the Azerbaijani Republic)

Abstract. The present article contains information concerning the new Cl-anionization technology in the preparation of hot drinking water. In contrast with water softening, that replaces all the hardness salts by sodium cations in the cation exchanger, this new technology makes it possible to replace incrustating HCO_3^- and SO_4^{2-} -anions in a strong-base anion exchanger by Cl^- -ions. As a result, the incrustation on the surfaces of heating hot water heaters is prevented. Thus, cations of hardness that are valuable for the human body remain in the water, the quality of the latter conforming to drinking water quality. Considering the important role of calcium and magnesium in the human body, in Germany and Turkey the minimum value of hardness cations in drinking water is limited to 2.85 and 7.50 mg-Eqv/l, respectively. According to the World Health Organization, in the composition of drinking water, the concentration of cations of magnesium and calcium is recommended, respectively, within 10–(20–30), and 20–50 mg/l; the minimum value of total hardness is 2–4 mg-Eqv/l. According to the developed technology drinking water is passed consistently in the downward direction through the mechanical and chlorine-anionite exchanger filters. In the latter, the main part of HCO_3^- and SO_4^{2-} -water ions are exchanged for Cl-anions of anionite. Then the water is collected in the tank, from where it is pumped to the hot water heater through the ultraviolet disinfection unit. After the depletion of the anionite by SO_4^{2-} and HCO_3^- -anions, it is regenerated by a solution of 8–12 % NaCl. The results of research by the anion exchangers Puro-lite A200EMBCI and AB-17-8 are plotted. It is noted that when the specific consumption of salt for regeneration is of about 45–55 kg/m³, working exchange capacity of the A200EMBCI occurs to be in the range 300–370 g-Eqv/m³. For anionization of water, the residual concentration of HCO_3^- -ions are changed from 0.5 to 3.2 mg-Eqv/l. The average concentration of these anions occurs to be between 1.8 and 2.2 mg-Eqv/l, when their initial value is 4.4 mg-Eqv/l.

Keywords: technology, Cl-anion exchange process, drinking water, exchange capacity, specific consumption, consumption of salt, regeneration, purification, anionite, cations of hardness, bicarbonate ions, water quality, H-cation exchange, softening, concentration

For citation: Jalilov M. F., Azimova M. M., Jalilova A. M. (2017) On a New Technology of Preparation of Hot Drinking Water. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Egn. Assoc.* 60 (5), 484–492. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-484-492 (in Russian)

Введение

При нормальной жизнедеятельности человеческому организму за один день, по разным оценкам, требуется от 1,5–2,5 до 6,0 л воды. Указанное количество воды поступает в виде жидкости, в составе пищи, а незначительная часть образуется в организме. Жидкость в организм поступает в основном в виде питьевой воды. Рациональный режим потребления питьевой воды с нормальным химическим составом обеспечивает благоприятный водно-солевой баланс в организме. Поэтому во всех странах мира к качеству питьевой воды предъявляются специальные требования. В ней ограничивается содержание концентрации катионов, анионов и других показателей. Один из важнейших компонентов питьевой воды – концентрация катионов жесткости кальция и магния.

Как известно, важнейшая составляющая костей и зубов человека – кальций. Он важен также для обеспечения нормальной работы сердца, внутриклеточной передачи информации, свертываемости крови и является регулятором нервно-мышечной возбудимости.

Немаловажное значение для человеческого организма имеют также катионы магния. Они являются кофактором и активатором не менее 300 ферментативных реакций в организме. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), дефицит кальция и магния в организме человека даже в развитых странах мира не может компенсироваться продуктами питания, особенно если питьевая вода бедна этими катионами [1–5].

У людей, пьющих обессоленную воду, полученную, например, в домашних обратноосмотических аппаратах, отфильтрованную через известняк, наблюдается нехватка кальция и магния в организме. Указанное было выявлено в городе Шевченко, где у людей наблюдались пониженная активность щелочной фосфатазы, уменьшение концентрации фосфора и кальция в плазме и декальцификация костной ткани.

Если недостаток поступления некоторых веществ в организм проявляет себя спустя несколько лет, недостаток кальция и магния обнаруживает себя гораздо быстрее – с увеличением количества больных с проблемами сердечно-сосудистой системы. К примеру, можно отметить население Чехии и Словакии, использовавшее в 2000–2002 гг. воду от центральной системы водоснабжения, где ее обработка осуществлялась на обратноосмотических аппаратах. Увеличилось число людей с сердечно-сосудистыми заболеваниями, у многих наблюдались усталость, слабость, мышечные судороги [1, 2].

Употреблять воду, бедную кальцием и магнием, особенно вредно для детей и женщин. У детей повышается риск переломов, происходят нейродегенеративные изменения. А у женщин это приводит к преждевременным родам и снижению веса новорожденных детей.

Учитывая столь важную роль катионов кальция и магния для человеческого организма, некоторыми государствами, такими как Германия и Турция, было ограничено минимальное значение катионов жесткости в питьевой воде. Например, в Германии, по некоторым литературным данным, минимальная концентрация жесткости в питьевой воде ограничивается значением 2,85 мг-экв/л. В Турции рекомендуемые значения катионов жесткости кальция и магния соответственно равны 5,0 и 2,5 мг-экв/л, а допустимая максимальная общая жесткость 10 мг-экв/л. Такое же максимальное значение жесткости значится и в нормах ВОЗ. Согласно ВОЗ, в составе питьевой воды рекомендуются концентрации:

- катионов магния – минимальное значение 10, максимальное 20–30 мг/л;
- катионов кальция – минимальное значение 20, оптимальное значение 50 мг/л;
- минимальное значение общей жесткости 2–4 мг-экв/л.

В России, например, для питьевой воды нецентрализованного и централизованного водоснабжения имеются ограничения только по максимальному значению общей жесткости, равной 7–10 мг-экв/л [6–8]. Имеются ограничения и по минимальному значению общей жесткости воды, расфасованной в емкости – 1,5 мг-экв/л [8]. Отсутствие ограничения по минимальному значению общей жесткости в основном связано с предотвращением накипеобразования на теплопередающих поверхностях нагрева установок подготовки горячей воды.

Основная часть

Как известно, часть питьевой воды в квартиры подается в горячем виде. Указанная вода греется в подогревателях горячего водоснабжения на теплопередающих поверхностях, на которых осаждается накипь. Учитывая, что коэффициент теплопроводности накипи в десятки раз меньше, чем латуни или стали, из которых обычно изготавливается поверхность нагрева подогревателей, это приводит к снижению их тепловой производительности. Кроме того, происходит осаждение накипи также в трубопроводах горячей воды, что повышает их гидравлическое сопротивление, в результате уменьшается расход горячей воды, подаваемой потребителям. Иногда это приводит к полному засорению сечения труб накипью и прекращению подачи горячей воды.

Образование накипи гораздо больше вредит аппаратам подготовки горячей воды, например на электро- или газонагревателях, где средний температурный уровень значительно выше, чем на водоводяных или же пароводяных подогревателях. Образование накипи на поверхности нагрева этих аппаратов приводит к ухудшению у них коэффициента теплопередачи, в результате чего происходит повышение температуры металла, деформация, разуплотнение нагреваемых частей и выход их из строя.

Для снижения накипеобразования в процессе подготовки горячей воды применяются различные технологии. К ним можно отнести подкисление, Н-катионирование в «голодном» режиме регенерации, магнитную обработку, обработку воды магнезитом и т. д. [9–11].

Однако все эти методы, кроме магнитной обработки и подкисления, предусматривают снижение концентрации катионов жесткости в обрабатываемой воде, иногда даже ниже допустимого минимального значения. В некоторых случаях для предотвращения образования накипи на поверхностях нагрева аппаратов подготовки горячей воды осуществляется полное умягчение нагреваемой воды, которое недопустимо по вышеизложенным причинам. Применение же метода подкисления не всегда представляется возможным, особенно на предприятиях, где использование кислоты как агрессивного реагента не допускается. Метод магнитной обработки воды не всегда дает положительные результаты и поэтому редко применяется.

Известно, что накипь в основном состоит из катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , анионов CO_3^{2-} , OH^- и SO_4^{2-} . Основные технологии обработки воды предусматривают снижение катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в обрабатываемой воде.

Предложенная новая технология подготовки воды для горячего водоснабжения предусматривает снижение в обрабатываемой воде концентрации накипеобразующих не катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , а анионов SO_4^{2-} и HCO_3^- ; из последнего образуются CO_3^{2-} - и OH^- -ионы. Указанный процесс осуществляется на высокоосновных анионитах, обычно пищевого качества. Аниониты при этом регенерируются раствором легкодоступного, неагрессивного и широко распространенного реагента NaCl .

Известна технология Na-Cl -ионирования воды, согласно которой в обрабатываемой воде одновременно происходит снижение жесткости и щелочности [6]. Для этого обрабатываемая вода последовательно пропускается через Na -катионитные фильтры первой ступени, Cl -анионитные и Na -катионитные фильтры второй ступени. В отличие от Na -катионирования, в процессе этого происходит резкое повышение концентрации катионов жесткости после их проскока в умягченной воде, Cl -анионитные фильтры работают с определенным значением проскока HCO_3^- -ионов, и основная часть очищенной воды содержит проскочившие HCO_3^- -анионы с концентрацией 1,0–1,5 мг-экв/л. Поэтому указанная технология применяется в котельных, где требуется снижение щелочности воды до 1,0–1,5 мг-экв/л [6]. Очевидно, что такую воду пить нельзя. Поэтому использовать технологию Na-Cl -ионирования воды для горячего водоснабжения не представляется возможным.

Применение же предлагаемой новой технологии Cl -анионирования для подготовки воды, подаваемой на горячее водоснабжение, позволяет снизить в обрабатываемой воде концентрации SO_4^{2-} - и HCO_3^- -анионов и предотвратить или же резко уменьшить накипеобразование в системе горячего водоснабжения.

Схема осуществления предлагаемой технологии показана на рис. 1. Как следует из рисунка, питьевая вода, последовательно в направлении сверху вниз пропускается через механический и хлор-анионитный фильтры. В механическом фильтре она очищается от присутствующих в ней возможных механических примесей. В хлор-анионитном фильтре происходит анионный обмен. Здесь основная часть сульфат- и бикарбонат-ионов воды обменивается на хлор-анионы анионита. Далее вода собирается в бак обработанной воды, откуда насосом через аппарат ультрафиолетовой дезинфекции подается в подогреватель горячего водоснабжения. После нагрева до установленного значения температуры она подается потребителям горячей воды.

После истощения анионита SO_4^{2-} - и HCO_3^- -анионами осуществляется его регенерация раствором (8–12)%-й поваренной соли. Скорость пропускания раствора соли через загрузки анионита принимается 4–6 м/ч.

Учитывая, что при обработке часть SO_4^{2-} - и HCO_3^- -анионов воды замещается хлор-ионами из анионита, вода при ее нагреве становится менее опасной по отношению к выпадению из нее накипи. Таким образом, количество накипи, выпадающей на поверхности нагрева подогревателя горячего водоснабжения и в трубопроводах горячей воды, значительно уменьшается.

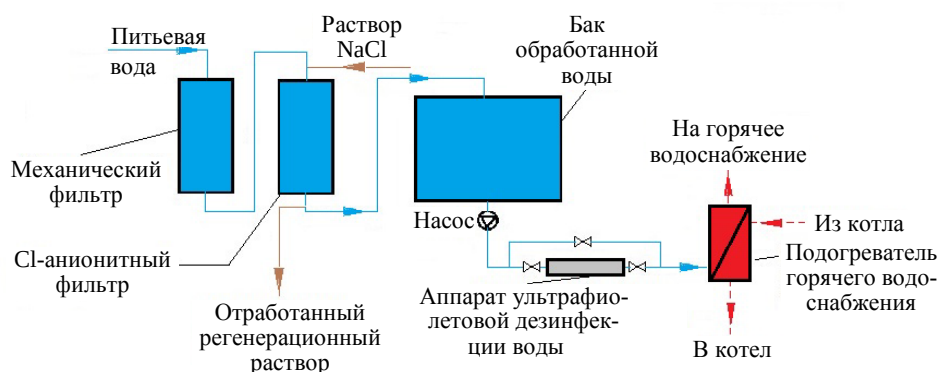


Рис. 1. Технологическая схема обработки воды Cl-анионированием

Fig. 1. Technological scheme of water treatment with Cl-anion exchange process

Для определения технологических параметров процесса хлор-анионирования воды проводились экспериментальные исследования на опытной установке, где впервые была внедрена предложенная технология. Опытная установка состояла из фильтра размером $\Phi 16'' \times H 65''$ с автоматическим электронным клапаном управления. Он был загружен сильноосновным анионитом пищевого качества фирмы Purolite A200EMBCl объемом 125 л. На обработку подавалась пресная питьевая вода с исходной щелочностью 4,4 мг-экв/л. При обработке снижались концентрации как SO_4^{2-} -, так и HCO_3^- -ионов. Отключение анионита на регенерацию осуществлялось при повышении концентрации HCO_3^- -ионов в обработанной воде до 3,2–3,5 мг-экв/л. Объем обработанной воды измерялся счетчиками, установленными на линии обработанной воды и на управляющем клапане. Регенерация анионита осуществлялась 10%-м раствором поваренной соли с удельным расходом 25, 50 и 75 кг/м³ и со скоростью фильтрования 10 м/ч. Получено, что с повышением значения удельного расхода соли от 25 до 75 кг/м³ рабочая обменная емкость поглощения анионита по HCO_3^- -ионам повышается от 144 до 395 г-экв/м³.

Эксплуатация анионитного фильтра в течение полутора лет показывала эффективность данной технологии. При этом рабочая обменная ем-

кость поглощения анионита при удельном расходе соли на регенерацию 45–55 кг/м³ получилась в пределах 300–370 г-экв/м³. До включения в работу установки анионирования воды трубопроводы горячей воды часто забивались накипью, а подогреватели промывались через каждые три-четыре месяца. Сетки смесителей горячей и холодной воды очищались один раз в неделю.

После десятимесячной эксплуатации анионитного фильтра вскрыли трубопроводы горячей воды, в которых накипи практически не было. Незначительное количество накипи наблюдалось в подогревателях горячей воды. Смесительные сетки стали прочищать каждый месяц.

При анионировании воды остаточная концентрация HCO_3^- -ионов изменялась в пределах от 0,5 до 3,2 мг-экв/л. Средняя концентрация этих анионов при исходном их значении, равном 4,4 мг-экв/л, при этом получилась 1,8–2,2 мг-экв/л. Один из характерных процессов анионирования воды показан на рис. 2.

Аналогичные результаты получены также при загрузке фильтра анионитом АВ-17-8. При загрузке анионитом АВ-17-8 остаточное значение бикарбонат-ионов получилось на 10–15 % меньше, чем при анионировании воды на анионите Purolite A200EMBCL. Соответственно и рабочая обменная емкость поглощения анионита АВ-17-8 оказалась больше, чем у анионита Purolite A200EMBCL.

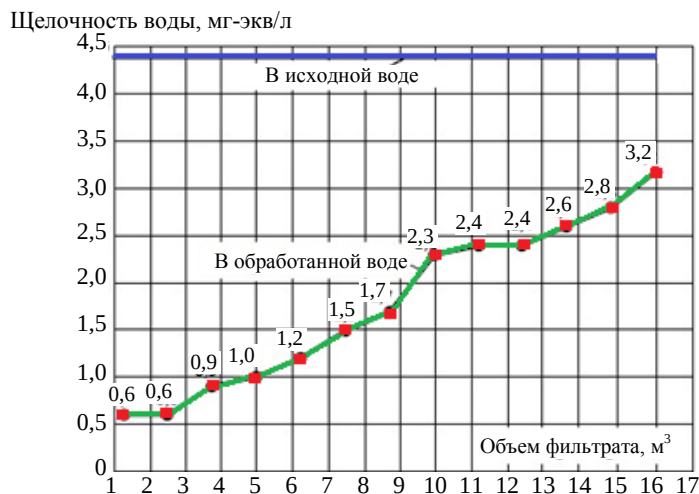


Рис. 2. Изменение щелочности обработанной воды в зависимости от величины объема фильтрата

Fig. 2. The change in alkalinity of the treated water depending on the value of the volume of the filtrate

ВЫВОДЫ

1. Разработаны технология хлор-анионирования воды и схема ее осуществления с высокоосновным анионитом.

2. Исследован процесс хлор-анионирования воды на опытно-промышленной установке анионитами Purolite A200EMBСI и АВ-17-8.

3. Значение рабочей обменной емкости анионита Purolite A200EMBСI при удельном расходе соли на регенерацию около 45–55 кг/м³ получилось в пределах 300–370 г-экв/м³.

4. Процесс хлор-анионирования воды позволяет уменьшить накипеобразование на теплопередающих поверхностях нагрева и трубопроводах системы горячего водоснабжения.

5. Технология хлор-анионирования воды дает возможность предотвратить накипеобразование без уменьшения катионов кальция и магния, которые важны для человеческого организма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нутриенты в питьевой воде [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://filtrofinfo.ru/o-vode/nutrienty-v-pit-evoj-vode.html>
2. Консенсус экспертов. Доклад совещания экспертов. Общественное здравоохранение и окружающая среда [Электронный ресурс]. Женева: Всемирная организация здравоохранения, 2008. Режим доступа: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/Ca%2BMg_consensusrep_ru.pdf
3. Вред дистиллированной воды [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.live-wtr.ru/vred-distillirovannoi-vody>.
4. Европейская Директива 80/778/ЕЕС от 15 июля 1980 г. по качеству питьевой воды, предназначенной для употребления человеком // Официальный журнал Европейского Союза. 1980. L229. С. 11–29.
5. Руководство по качеству питьевой воды. 2-е изд., в 2 т. Критерии безопасности для здоровья и другая сопутствующая информация. Женева: ВОЗ, 1996. Т. 2. С. 237–240.
6. Гигиенические требования к качеству воды нецентрализованного водоснабжения. Санитарная охрана источников: СанПиН 2.1.4.1175–02: введ. 01.03.2003. М., 2003. 20 с.
7. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем водоснабжения. Контроль качества. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы: СанПиН 2.1.4.1074–01. М., 2002. 90 с.
8. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды, расфасованной в емкости. Контроль качества. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы: СанПиН 2.1.4.1116–02. Москва, 2002. 22 с.
9. Лифшиц, О. В. Справочник по водоподготовке котельных установок. / О. В. Лифшиц. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1976. 288 с.
10. Мещерский, Н. А. Эксплуатация водоподготовительных установок электростанций высокого давления. 2-е изд., перераб. / Н. А. Мещерский. М.: Энергоатомиздат, 1984. 408 с.
11. Методические указания. Нормы качества сетевой и подпиточной воды водогрейных котлов, организация водно-химического режима и химического контроля: РД 24.031.120–91. Москва, 1991. 31 с.

Поступила 12.01.2017 Подписана в печать 20.03.2017 Опубликована онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. *Nutrients in Drinking Water* (20.04.2015). Available at: <https://filtrofinfo.ru/o-vode/nutrienty-v-pit-evoj-vode.html> (in Russian).

2. *The Consensus of Experts – Report of the Expert Meeting. Public Health and the Environment.* (2008). Geneva, World Health Organization. Available at: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/Ca%2BMg_consensusrep_ru.pdf. (in Russian).
3. *Harm of Distilled Water.* Available at: <http://www.live-wtr.ru/vred-distillirovannoi-vody> (in Russian).
4. European Directive 80/778/EEC of 15 July 1980 on the Quality of Drinking Water Intended for Human Consumption. (1980) *Official Journal of the European Union*, L229, 11–29 (in Russian).
5. *A Guide to Drinking Water Quality. Vol. 2: Safety Criteria for Health and Other Related Information.* 2nd ed. (1996). Geneva, WHO, 237–240 (in Russian).
6. Sanitary Regulations and Norms (SanPiN) 2.1.4.1175–02. Hygienic Requirements to Water Quality of Centralized Water Supply. Sanitary Protection of Sources. Moscow, 2003. 20 (in Russian).
7. Sanitary Regulations and Norms (SanPiN) 2.1.4.1074–01. Drinking Water. Hygienic Requirements to Water Quality of Centralized Water Supply Systems. Quality Control. Sanitary-Epidemiological Rules and Norms. Moscow, 2002. 90 (in Russian).
8. Sanitary Regulations and Norms (SanPiN 2.1.4.1116–02). Drinking Water. Hygienic Requirements to the Quality of the Water Packaged in Capacity. Quality Control. Sanitary-Epidemiological Rules and Standards. Moscow, 2002. 22 (in Russian).
9. Lifshchits O. V. (1976) *Handbook for Process Boilers.* 2nd ed. Moscow, Energiya Publ. 288. (in Russian).
10. Meshcherskii N. A. (1984) *Operation of Power Plant Water Treatment Units of High Pressure.* 2nd ed. Moscow, Energoatomizdat Publ. 408 (in Russian).
11. Guidance Document (RD) 24.031.120–91. Methodic Instructions. Norms of Quality of the Network and Feed Water of Water Boilers, Organization of Water-Chemical Regime and Chemical Control. Moscow, 1991. 31 (in Russian).

Received: 12 January 2017 Accepted: 20 March 2017 Published online: 29 September 2017