

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ДОКЛАДЫ
АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2016

январь–март

№ 1 (30)



Выходит четыре раза в год

ISSN 1727-2769

Учредители

*Академия наук высшей школы России
Новосибирское отделение Академии наук высшей школы*

Главный редактор

А.Г. Вострецов, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ

Заместитель главного редактора

В.Н. Васюков, д-р техн. наук, проф.

Редакционный совет

М. Грайцар, PhD, проф. (Словакия)
А. Загоскин, PhD (Великобритания)
Е.В. Ильичев, д-р физ.-мат. наук, проф. (Германия)
М.Н. Клымаш, д-р техн. наук, проф. (Украина)
К. Арутюнов, д-р физ.-мат. наук
И.С. Грузман, д-р техн. наук, проф.
В.Г. Дубровский, д-р физ.-мат. наук, проф.
Б.А. Князев, д-р физ.-мат. наук, проф.
Г.В. Майер, д-р физ.-мат. наук, проф., засл. деятель науки РФ
В.К. Макуха, д-р техн. наук, проф.
В.Я. Рудяк, д-р физ.-мат. наук, проф.
С.А. Харитонов, д-р техн. наук, проф.
Г.М. Шумский, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

Д.О. Соколова, канд. техн. наук

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций в 2002 г. (свидетельство ПИ № 77-11517 от 04.01.2002 г.)

Адрес редакции: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, корп. 4, ком. 415,
телефон: (383) 346-15-37, факс: (383) 346-02-09. Email: danvshrf@corp.nstu.ru

© Новосибирское отделение АН ВШ, 2016 г.

**PROCEEDINGS
OF THE RUSSIAN HIGHER SCHOOL
ACADEMY OF SCIENCES**

2016

January–March

№ 1 (30)



Journal is published quarterly

ISSN 1727-2769

Journal was established by

*Russian Higher Education Academy of Science
Novosibirsk Branch of Higher Education Academy of Science*

Chief Editor

A.G. Vostretsov, D.Sc. (Eng.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation

Deputy Chief Editor

V.N. Vasyukov, D.Sc. (Eng.), Prof.

Editorial Council

M. Grajcar, PhD, Prof. (Slovakia)
A. Zagoskin, PhD (United Kingdom)
E.V. Ilyichev, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. (Germany)
M.M. Klymash, D.Sc. (Eng.), Prof. (Ukraine)
K. Arutyunov, D.Sc. (Phys.&Math.)
I.S. Gruzman, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.G. Dubrovsky, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
B.A. Knyazev, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
G.V. Mayer, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation
V.K. Makukha, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.Ya. Rudyak, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
S.A. Haritonov, D.Sc. (Eng.), Prof.
G.M. Shumsky, D.Sc. (Eng.), Prof.

Executive Secretary

D.O. Sokolova, C.Sc.(Eng.)

Editor Address: Office 415, 20 bld. 4, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russian Federation.
Tel: +7 (383) 346-15-37. Fax: +7 (383) 346-02-09. Email: danvshrf@corp.nstu.ru

© Novosibirsk Branch of Higher Education Academy of Science, 2016 r.

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Чесноков Д.В., Михайлова Д.С.

Спектральные исследования оптического поглощения адсорбированных слоев летучих карбониллов металлов7

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Бычков А.Л., Коробейников С.М., Дарьян Л.А.

Экспериментальное исследование сохранности проб трансформаторного масла в пробоотборном устройстве с гибкой оболочкой15

Волков А.Г., Зиновьев Г.С.

Алгоритм преобразования сигналов управления инвертором напряжения в сигналы управления инвертором тока21

Горбачев А.П., Шведова А.В.

Исследование дипольных возбуждателей многолучевых директорных антенн34

Драгунов В.П., Доржиев В.Ю.

Влияние краевых эффектов на функционирование МЭМС48

*Иванов Б.И., Новиков И.Л., Пономарев Д.В., Султанов А.Н.,
Вострецов А.Г., Ильичев Е.В.*

Экспериментальное исследование свойств криогенного малошумящего SiGe усилителя при субкельвиновых температурах62

Мейкиан В.И.

К вопросу анализа дисциплины приоритетного обслуживания
при многоуровневом управлении сетями связи73

Ольховский В.Я., Мятёж Т.В., Наяков С.Ю.

Исследование воздействия высших гармоник мелких
нелинейных потребителей на работу сети до 1000 В84

Секретарев Ю.А., Мехтиев А.Д.

Ситуационный подход к созданию подсистемы управления
составом гидроагрегатов на гидростанциях98

Чичиндаев А.В., Дьяченко Ю.В., Хромова И.В.

Влияние внутренних источников тепла на процессы
теплообмена в системе «человек – тепловая защита –
окружающая среда» 108

CONTENTS

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Chesnokov D.V., Mikhailova D.S.

The investigation of optical absorption spectra of adsorbed layers
of volatile metal carbonyls7

TECHNICAL SCIENCES

Bychkov A.L., Korobeynikov S.M., Darian L.A.

Experimental study of transformer oil sample safety in a sampler
with a flexible shell15

Volkov A.G., Zinoviev G.S.

The algorithm of converting voltage source inverter control
signals into current source inverter control signals21

Gorbachev A.P., Shvedova A.V.

Investigation of the dipole drivers for multi-beam Yagi-Uda
antennas34

Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu.

Fringing field effects influence on MEMS functioning48

*Ivanov B.I., Novikov I.L., Ponomarev D.V., Sultanov A.N.,
Vostretsov A.G., Il'ichev E.V.*

The experimental study of cryogenic low noise SiGe amplifier
at subkelvin temperatures 62

Meikshan V.I.

On analysis of priority-based service discipline in multilevel
telecom network management system.....73

Olhovskiy V.Ya., Myateg T.V., Nayaksov S.Yu.

Predictions of circuit high harmonics values increase
in the networks of up to 1000 V84

Sekretarev Yu.A., Mehtiev A.D.

Situational approach to creating subsystems operate the members
of a hydropower units (RUSA)98

Chichindaev A.V., Dyachenko Y.V., Khromova I.V.

Effect of internal heat sources on the processes of heat transfer
in the system «human – thermal protection – environment»108

УДК 54.432

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ
АДСОРБИРОВАННЫХ СЛОЕВ ЛЕТУЧИХ КАРБЕНИЛОВ МЕТАЛЛОВ****Д.В. Чесноков, Д.С. Михайлова***Сибирский государственный университет геосистем и технологий*

В технологиях лазерно-индуцированного химического осаждения тонких пленок на подложки фундаментальную роль играют процессы адсорбции молекул реагентов из парогазовой фазы на облучаемые поверхности. Скорость осаждения, разрешение процесса при формировании микро- и наноструктур, параметры получающегося осадка определяются состоянием адсорбированного слоя молекул и скоростью его восстановления после каждого лазерного импульса. Управление состоянием адсорбированного слоя требует знания характера адсорбции и оптических характеристик адсорбированного слоя, который предпочтительно должен быть мономолекулярным. Исследование спектров оптического поглощения в таких слоях встречается с проблемами в связи с малой величиной поглощения, поглощение необходимо усиливать, для чего в литературе рекомендуется многократно пропускать один и тоже световой поток через адсорбированный слой. В настоящей работе предложен лабораторный метод исследования оптического поглощения мономолекулярных адсорбированных слоев летучих карбенилов металлов с использованием промышленного спектрофотометра СФ-56, который дополняется оптической кюветой, в которой создается атмосфера паров карбенилов и помещается стопа прозрачных пластин: кювета устанавливается в кюветном отделении спектрофотометра. Проведен анализ метрологических параметров кюветы, определено оптимальное значение количества пластин в пакете, помещаемом в кювету для усиления слабого поглощения. В результате разработки и использования оптической кюветы при лабораторных исследованиях обнаружено увеличение оптического поглощения мономолекулярными адсорбированными слоями карбенилов хрома и рения при увеличении температуры подложки от 25 до 85 °С, что можно объяснить переходом молекул из физсорбированного состояния в хемосорбированное. Измерена величина этого эффекта в видимом диапазоне спектра, измерены коэффициенты поглощения мономолекулярных адсорбированных слоев карбенилов хрома и рения.

Ключевые слова: металлоорганические соединения, адсорбция, оптический спектр поглощения, парциальное давление, подложки, пленки, карбенилы, микротехнологии.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-7-14

Введение

Получение тонких металлических пленок металлов из паров карбенилов широко распространено как в технике нанесения металлических покрытий, так и в электронике [1]. Лазерно-индуцированное химическое осаждение тонких пленок на подложку из паровой фазы (LCVD) исследовано в работе [2], изготовление интегральных схем с использованием лазерно-пиролитической технологии описано в сообщении [3], проблемы получения пленок рения на прозрачных подложках в процессах LCVD с использованием наносекундной длительности лазерных импульсов на длине волны 337нм исследованы в работах [4, 5], микротехнологии опто- и микроэлектроники, основанные на использовании наносекундного лазерного пиролиза, обсуждаются в монографии [6]. Начальным этапом лазерно-химического преобразования исходного вещества является поглощение подложкой или молекулами химического соединения фотонов падающего излучения. Установлено, что спектр поглощения света молекулами данного вещества зависит от того, находятся ли молекулы в газовой фазе, или адсорбированы на поверхно-

сти, причем имеет значение характер адсорбции (физическая или химическая) [7, 8]. Особенности исследования оптических спектров поглощения адсорбированных слоев обсуждаются в сообщении [9], роль управления адсорбционными процессами в технологиях LCVD исследуется в работах [10, 11].

В настоящее время информации о спектрах поглощения адсорбированных молекул ряда перспективных для микротехнологий химических соединений, в том числе летучих металлоорганических соединений, в известной литературе недостаточно, поэтому задача измерения таких спектров является актуальной.

1. Постановка задачи

Проблема измерения спектров поглощения адсорбированных молекул затруднена тем, что в мономолекулярном слое поглощается менее 0,001 доли проходящего света.

В основе предложенного подхода лежит известный [12] прием усиления эффекта поглощения за счет использования прохождения света монохроматора через пакет одинаковых прозрачных плоских пластин с адсорбированными слоями молекул на каждой пластинке.

В соответствии с законом Бугера [13] интенсивность $I(z)$ света, прошедшего в среде с поглощающими частицами некоторое расстояние, зависит от концентрации частиц в среде экспоненциально:

$$I(z) = I_0 \exp(-\sigma n_s),$$

где σ – сечение поглощения излучения молекулой, n_s – поверхностная концентрация адсорбированных молекул, I_0 – интенсивность падающего света. При прохождении светом пластины с адсорбированными на ее двух поверхностях слоями свет, кроме поглощения на слоях, испытывает на каждой поверхности френелевское отражение, что приводит к тому, что на следующую в ряду пластину падает излучение с интенсивностью на 8 % меньше, чем на предшествующую. Можно найти, что интенсивность света, прошедшего N пластин с адсорбированными слоями, равна

$$I_N = I_0 (0,92 - 2\sigma n_s)^N.$$

При этом разностный сигнал каналов сравнения равен

$$\frac{\Delta I_N}{I_0} = 0,92^{N-1} \cdot 2N\sigma n_s. \quad (1)$$

Необходимо учитывать, что поверхностная концентрация адсорбированных молекул зависит от температуры подложки и среды. При равновесном состоянии процесса адсорбции концентрация на поверхности адсорбированных молекул может быть описана изотермой Лэнгмюра или изотермой БЭТ [14]. Давление насыщенных паров химического соединения в атмосфере зависит от температуры среды экспоненциально. Теория предсказывает, что в зависимости от условий число слоев молекул в адсорбированном слое может быть от доли слоя до нескольких слоев.

2. Экспериментальные исследования

На рис. 1 показана схема оптической кюветы для спектральных исследований адсорбированных на пластинах слоев молекул, устанавливаемой в кюветном отделении спектрофотометра по ходу луча после выходной щели монохроматора.

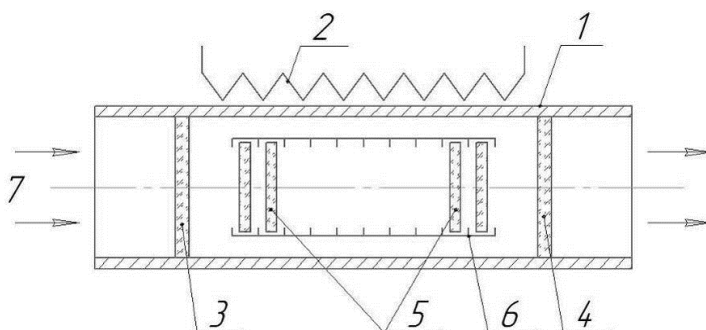


Рис. 1 – Оптическая кювета:

1 – герметичный корпус кюветы; 2 – нагревательный элемент; 3 и 4 – входное и выходное прозрачные окна; 5 – подложки (10 шт.); 6 – кассета для подложек; 7 – световой поток

Fig. 1 – Optical cuvette:

1 – sealed body of the cell; 2 – heating element; 3 и 4 – the input and the output transparent window; 5 – substrates (10 piece); 6 – cassette for substrates, 7 – luminous flux

Атмосферу паров адсорбируемых на поверхности подложек веществ создают нагреванием кюветы с загруженным веществом. Для обеспечения режима сравнения для исследований в кюветное отделение спектрофотометра помещают две аналогичные кюветы с одинаковым количеством подложек, одна из которых не содержит исследуемого вещества; необходимо принимать меры для обеспечения равномерной адсорбции молекул из пара на всех поверхностях подложек в кювете: требуется обеспечить строгое равенство температуры во всей полости кюветы и перед началом измерений добиваться установления равновесного состояния процессов в кювете.

Исследовались спектры поглощения адсорбатов $\text{Cr}(\text{CO})_6$, $\text{Re}_2(\text{CO})_{10}$.

При проведении спектральных измерений в неподвижной воздушной среде навеска химического летучего соединения во время измерения полностью не испарялась, что говорит о том, что давление пара в кювете при измерениях было равно давлению насыщенного пара соединения. При этом количество монослоев адсорбированных молекул не может быть определено на основании хода изотерм адсорбции. Давление насыщенного пара карбониллов многих металлов в диапазоне температур 30...100 °С изменяется в пределах 1...100 Па [15].

Исследования поглощения адсорбированными слоями проводились с использованием спектрофотометров СФ-56. Основной атмосферой кюветы был воздух, навеска карбонила также вводилась заранее, обеспечивалось равновесное состояние атмосферы; концентрация молекул карбонила в адсорбированном слое заведомо превышала концентрацию в плотно заполненном монослое. Спектры поглощения приведены на рис. 2 и 3.

Для пересчета измеренного на 10 подложках коэффициента поглощения на значение, соответствующее одному адсорбированному слою, необходимо, в соответствии с (1), результат из графика разделить на величину $2N \cdot 0,92^{N-1} = 9,443$.

Ход спектральных кривых в случае декакарбонила дирения (рис. 2) в диапазоне 200...340 нм характерен резким увеличением поглощения и медленным практически одинаковым по спектру подъемом кривых почти параллельно друг другу в диапазоне длиннее 380 нм после нагревания до температур 57...75...87 °С. Значительное увеличение поглощения в коротковолновом диапазоне спектра может свидетельствовать об электронных перестройках в адсорбированных молекулах

при повышении температуры, например, связанных с переходом из физсорбированного состояния в хемосорбированное. Увеличение поглощения в длинноволновой части спектра требует объяснения.

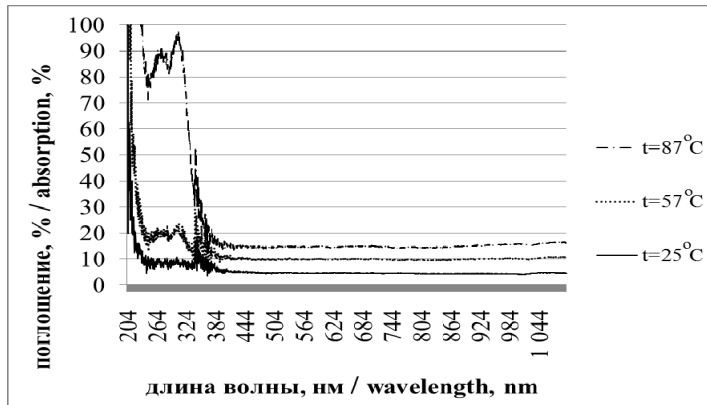


Рис. 2 – Спектр поглощения адсорбированного на поверхности кварцевой подложки из пара слоя карбонила рения при различных температурах подложки

Fig. 2 – The absorption spectrum of adsorbed on the surface of the quartz substrate from vapor of the layer of rhenium carbonyl at various temperatures of the substrate

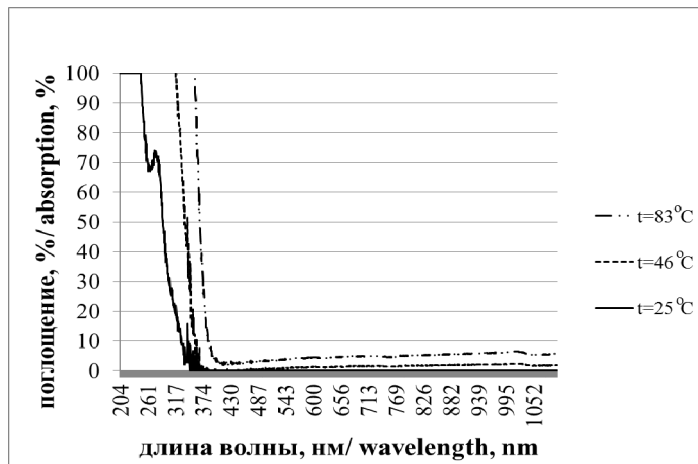


Рис. 3 – Спектр поглощения адсорбированного на поверхности кварцевой подложки из пара слоя карбонила хрома при различных температурах подложки

Fig. 3 – The absorption spectrum of adsorbed on the surface of the quartz substrate from vapor of the layer of chrome carbonyl at various temperatures of the substrate

Спектры на рис. 3 показывают монотонное изменение показателя поглощения в диапазоне длин волн 520...1100 нм с изменением температуры, при укорочении длины волны менее 350 нм поглощение резко увеличивается. Изменения спектра поглощения в коротковолновой области выглядят как сдвиг края поглощения в

длинноволновую область при увеличении температуры. Последнее может объясняться, как и в случае с декакарбонилем дирения, переходом молекул из физсорбированного состояния в хемосорбированное.

Четко заметно увеличение поглощения в длинноволновом диапазоне при увеличении температуры кюветы, что можно отнести к увеличению количества адсорбированных мономолекулярных слоев при нагревании подложек в среде с насыщенным паром карбонила.

Пересчет приведенных на графиках результатов в спектральное поглощение адсорбированного на одной поверхности подложки слоя дает следующие значения:

- для декакарбонила дирения на длине волны 300 нм при температуре подложки 87°С поглощение ~ 10 %, при температуре 57°С ~ 2%;
- для гексакарбонила хрома максимальное поглощение более 10 % при температуре более 39°С при длинах волн короче 380 нм.

Заключение

Представленные результаты подтверждают возможности предложенного подхода при исследовании спектров поглощения летучих карбонилей металлов в адсорбированном на прозрачных подложках состоянии; чувствительность спектрофотометра среднего класса с предложенной оптической кюветой позволяет исследовать спектры поглощения монослоев молекул.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сыркин В.Г. Карбонилы металлов. – М.: Химия, 1983. – 200 с.
2. Чесноков В.В., Земсков С.В., Игуменов И.Г. Лазерно-химическое осаждение пленок металлов // Тезисы докладов 5 отраслевой научно-технической конференции «Тонкие пленки в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем». – Нальчик, 1983.
3. Wafer-scale laser pantography: fabrication on n-metal-oxide-semiconductor transistors and small-scale integrated circuits by direct-write laser-induced pyrolytic reactions / В.М. McWilliams, I.P. Herman, F. Mitlitsky, R.A. Hyde, L.L. Wood // Applied Physics Letters. – 1983. – Vol. 43, N 10. – P. 946–948. – doi: 10.1063/1.94191.
4. Chesnokov D.V., Chesnokov V.V., Reznikova E.F. Problems of nanosecond laser technologies of film microstructures deposition // 7th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings: APEIE–2004, Russia, Novosibirsk, 20–23 September 2004. – Novosibirsk: NSTU, 2004. – Vol. 1. – P. 216–226.
5. Чесноков Д.В. Лазерное пиролитическое осаждение пленок металлов на прозрачных подложках // Прикладная оптика–2006: сборник трудов VII международной конференции, Санкт–Петербург, 16–20 октября 2006 г. – СПб.: Оптическое общество им. Д.С. Рождественского, 2006. – Т. 2: Оптические материалы и технологии. – С. 125–129.
6. Чесноков В.В., Резникова Е.Ф., Чесноков Д.В. Лазерные наносекундные микротехнологии / под общ. ред. Д.В. Чеснокова. – Новосибирск: СГГА, 2003.
7. Лазнева Э.Ф. Лазерная десорбция. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1990. – 200 с.
8. Аюпян М.Е. Молекулярные фотопроцессы на границе раздела газ – твердое тело // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 2. – С. 115–120.
9. Mikhailova D.S., Chesnokov V.V., Chesnokov D.V. Principle of absorption spectrum measurement of the layers adsorbed on transparent substrates // Key Engineering Materials. – 2010. – Vol. 437. – P. 594–597. – doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.437.594.
10. Чесноков Д.В., Чесноков В.В. Гетерофазный процесс лазерно-пиролитического формирования тонких пленок в условиях адсорбционного ограничения поступления реагентов // ГЕО-Сибирь–2011: сборник материалов VII Международного научного конгресса, Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г. – Новосибирск: СГГА, 2011. – Т. 5:

- Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии. Ч. 2. – С. 3–11.
11. **Чесноков В.В., Чесноков Д.В.** Лазерный интерференционный метод термохимического формирования регулярных наноструктур на подложках // Российская конференция и школа по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотоелектроники «Фотоника-2011», Россия, Новосибирск, 22–26 августа 2011 г.: тезисы докладов. – Новосибирск: ИФП СО РАН, 2011. – С. 80.
 12. Резонансные гетерогенные процессы в лазерном поле / отв. ред. Ю.Н. Петров. – М.: Наука, 1988. – 160 с. – (Труды ИОФАН; т. 11).
 13. **Ахманов С.А., Никитин С.Ю.** Физическая оптика. – М.: Изд-во МГУ: Наука, 2004. – 656 с.
 14. **Чесноков В.В., Чесноков Д.В., Михайлова Д.С.** Методика и экспериментальное исследование спектров поглощения адсорбированных слоев летучих металлоорганических соединений // Интерэкспо Гео-Сибирь-2015. – Новосибирск: СГУГИТ, 2015. – Т. 5, вып. 1. – С. 148–153.
 15. **Сыркин В.Г.** CVD-метод. Химическая парофазная металлизация. – М.: Наука, 2000. – 496 с.

THE INVESTIGATION OF OPTICAL ABSORPTION SPECTRA OF ADSORBED LAYERS OF VOLATILE METAL CARBONYLS

Chesnokov D.V., Mikhailova D.S.

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

In technology of laser-induced chemical vapor deposition of thin films on substrates fundamental role played by processes of adsorption of reactant molecules from the vapor phase on the irradiated surface. The deposition rate and the resolution of process in the formation of micro- and nanostructure, the parameters of the resulting deposit is determined by the state of the adsorbed layer of molecules and the speed of his recovery after each laser pulse. State management adsorbed layer requires understanding of the nature of adsorption and optical characteristics of the adsorbed layer, which preferably should be monomolecular. Study of the spectra of optical absorption in these layers faces the problems increasing low absorption level. In the literature recommended to repeatedly passing the same light flux through the adsorbed layer. In this paper, we propose a laboratory method to study the optical absorption of adsorbed monomolecular layers of volatile carbonyls of metals using industrial spectrophotometer SF-56, which complemented by a transparent reactor, which consist an atmosphere of a vapor of carbonyls and placed kit transparent plates: reactor set in the cuvette compartment of the spectrophotometer. The metrological parameters of the method are analysis; the optimum value of the number of plates in a kit that placed in the reactor for amplification of weak absorption is describe. At the result of developing and using of optical cuvettes in laboratory investigation found to increase the optical absorption monomolecular adsorbed layers of chromium and rhenium carbonyls with increasing substrate temperature from 25 to 85 °C, which explained by the transition of molecules from chemisorbed to physical adsorbed state. The magnitude of this effect in the visible range of the spectrum, the absorption coefficients of the adsorbed monomolecular layers of carbonyls of chromium and rhenium measured.

Keywords: metalloorganic compounds, adsorption, absorption spectrum, partial pressure, substrates, films, carbonyls, microtechnologies

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-7-14

REFERENCES

1. Syrkin V.G. *Karbonily metallov* [Metal carbonyls]. Moscow, Khimiya Publ., 1983. 200 p.
2. Chesnokov V.V., Zemskov S.V., Igumenov I.G. [Laser-chemical deposition of films of metals]. *Tezisy dokladov 5 otraslevoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Tonkie plenki v proizvodstve poluprovodnikovyykh priborov i integral'nykh skhem"* [Proceedings 5 the industry

- scientific and technical conference "Thin films in the manufacture of semiconductor devices and integrated circuits"]. Nal'chik, 1983.
3. McWilliams B.M., Herman I.P., Mitlitsky F., Hyde R.A., Wood L.L. Wafer-scale laser pantography: fabrication on n-metal-oxide-semiconductor transistors and small-scale integrated circuits by direct-write laser-induced pyrolytic reactions. *Applied Physics Letters*, 1983, vol. 43, no. 10, pp. 946–948. doi: 10.1063/1.94191
 4. Chesnokov D.V., Chesnokov V.V., Reznikova E.F. Problems of nanosecond laser technologies of film microstructures deposition. *7th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings: APEIE–2004*, Russia, Novosibirsk, 20–23 September 2004, vol. 1, pp. 216–226.
 5. Chesnokov D.V. [Laser pyrolytic deposition of metal films on transparent substrates]. *Prikladnaya optika–2006*. Т. 2: *Opticheskie materialy i tekhnologii: sbornik trudov VII mezhdunarodnoi konferentsii* [Applied optics–2006. Vol. 2: Optical materials and technologies: Proceedings of the VII International Conference], St. Petersburg, 16–20 October 2006, pp. 125–129.
 6. Chesnokov V.V., Reznikova E.F., Chesnokov D.V. *Lazernye nanosekundnye mikrotekhnologii* [Nanosecond laser microtechnology]. Ed. by D.V. Chesnokov. Novosibirsk, SSGA Publ., 2003.
 7. Lazneva E.F. *Lazernaya desorbtsiya* [Laser desorption]. Leningrad, Leningradskii universitet Publ., 1990. 200 p.
 8. Akopyan M.E. *Molekulyarnye fotoprotsessy na granitse razdela gaz – tverdoe telo* [Molecular photoprocesses at the interface gas – solid]. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal – Soros Educational Journal*, 1998, no. 2, pp. 115–120.
 9. Mikhailova D.S., Chesnokov V.V., Chesnokov D.V. Principle of absorption spectrum measurement of the layers adsorbed on transparent substrates. *Key Engineering Materials*, 2010, vol. 437, pp. 594–597. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.437.594
 10. Chesnokov D.V., Chesnokov V.V. [Heterophase process of laser-pyrolytic thin film deposition in conditions of reagent entry adsorption limiting]. *GEO-Sibir'–2010: sbornik materialov VII Mezhdunarodnogo kongressa* [GEO-Siberia–2010: The collection of materials of the VII International Congress], Novosibirsk, 19–29 April 2011, vol. 5, pt. 2, pp. 3–11. (In Russian)
 11. Chesnokov V.V., Chesnokov D.V. [Laser interference method of thermochemical formation of regular nanostructures on substrates]. *Rossiiskaya konferentsiya i shkola po aktual'nykh problemam poluprovodnikovoi nanofotoelektroniki "Fotonika–2011": tezisy dokladov* [Russian conference and school on actual problems of semiconductor nanophotonic "Photonics–2011": abstracts], Russia, Novosibirsk, 22–26 August 2011, p. 80. (In Russian)
 12. Petrov Yu.N., ed. *Rezonansnye geterogennye protsessy v lazernom pole* [Resonant heterogeneous processes in a laser field]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 160 p.
 13. Akhmanov S.A., Nikitin S.Yu. *Fizicheskaya optika* [Physical optics]. Moscow, MSU Publ., Nauka Publ., 2004. 656 p.
 14. Chesnokov V.V., Chesnokov D.V., Mikhailova D.S. [Method and experimental research of the absorption spectrum of adsorbed layers of volatile metalorganic compounds]. *Interekspo Geo-Sibir'–2015* [InterExpo Geo-Siberia–2015]. Novosibirsk, SSUGT Publ., 2015, vol. 5, iss. 1, pp. 148–153.
 15. Syrkin V.G. *CVD-metod. Khimicheskaya parofaznaya metallizatsiya* [CVD method. Chemical vapor metallization]. Moscow, Nauka Publ., 2000. 496 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Чесноков Дмитрий Владимирович – родился в 1964 году, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой наносистем и оплотехники, кафедра наносистем и оплотехники Сибирского государственного университета геосистем и технологий. Область научных интересов: лазерное осаждение пленок металлов. Опубликовано 200 научных работ. (Адрес: 630079, Россия, Новосибирск, Станиславского, 48. E-mail: phys003@list.ru).

Chesnokov Dmitry Vladimirovich (b. 1964) – Ph.D., Professor, chair of Nanosystems and Optical Engineering Department in the Siberian State University of Geosystems and Technologies. His research interests are currently focused on Laser pyrolytic deposition of metal films on transparent substrates. He is author of 200 scientific papers. (Address: 48, Stanislavskogo St., Novosibirsk, 630079, Russia. E-mail: phys003@list.ru).



Михайлова Дарья Сергеевна – родилась в 1983 году, старший преподаватель кафедры физики Сибирского государственного университета геосистем и технологий. Область научных интересов: интерферометрия. Опубликовано 20 научных работ. (Адрес: 630107, Россия, Новосибирск, Тrolleyная, 142. E-mail: daria-83@mail.ru).

Mikhailova Daria Sergeevna (b. 1983) – superior lecture, chair of physics in the Siberian State University of Geosystems and Technologies. His research interests are currently focused on interferometry. He is author of 20 scientific papers. (Address: 142, Trolleyaynaya St., Novosibirsk, 630107, Russia. E-mail: daria-83@mail.ru).

*Статья поступила 07 октября 2015 г.
Received October 07, 2015*

To Reference:

Chesnokov D.V., Mikhailova D.S. Spektral'nye issledovaniya opticheskogo pogloshcheniya adsorbiruyemykh sloev letuchikh karbonilov metallov [The investigation of optical absorption spectra of adsorbed layers of volatile metal carbonyls]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 1 (30), pp. 7–14. doi: 10.17212/1727-2769-2016-1-7-14

УДК 53.043, 62.76.03

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОХРАННОСТИ ПРОБ
ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА В ПРОБООТБОРНОМ УСТРОЙСТВЕ
С ГИБКОЙ ОБОЛОЧКОЙ****А.Л. Бычков¹, С.М. Коробейников¹, Л.А. Дарьян²**¹Новосибирский государственный технический университет²Техническая Инспекция ЕЭС

Известно, что основным диагностическим методом силового высоковольтного маслонаполненного электрооборудования является физико-химический анализ диэлектрической жидкости. Достоверность физико-химического анализа состояния высоковольтного маслонаполненного электрооборудования не в последнюю очередь зависит от пробоотборного устройства. В настоящее время перспективным направлением является разработка пробоотборных устройств с гибкой оболочкой, обладающих, по сравнению со стеклянными устройствами, лучшими эксплуатационными характеристиками. Ранее было предложено использовать в качестве пробоотборников многослойные металл-полимерные пакеты. В статье представлены результаты экспериментальных исследований сохранности пробы в пробоотборниках с гибкой стенкой, которые обеспечили срок хранения до 6 недель без потери представительности.

Ключевые слова: диагностика, высоковольтное маслонаполненное электрооборудование, пробоотборное устройство, гибкая оболочка, сохранность, газы, утечка.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-15-20

Введение

Известно, что как в России, так и за рубежом сложилась тенденция старения парка электрооборудования [1]. Замена всех устаревших единиц электрооборудования зачастую невозможна ввиду экономических и технических сложностей, к тому же не всегда рациональна. Поэтому своевременное выявление развивающихся дефектов является необходимым условием безотказной работы силового электрооборудования. Физико-химическая диагностика, основанная на анализе проб материалов (как правило, изоляционных) электротехнического оборудования, является одним из самых информативных методов оценки состояния этого оборудования. Устройства для отбора, хранения и транспортировки проб играют важную роль в обеспечении достоверности физико-химического анализа, что, в свою очередь, имеет решающее значение для диагностического заключения о состоянии электрооборудования. Вопросам отбора проб из высоковольтного маслонаполненного электрооборудования, как первого этапа проведения любого физико-химического анализа, в последние годы посвящен ряд работ [2–4]. Все эти работы рассматривают отбор, транспортирование и хранение проб изоляционной жидкости – трансформаторного масла (ТМ). В то же время на электроэнергетических объектах все большее применение получает высоковольтное оборудование, в котором изоляционной средой является либо отдельный газ, либо смесь газов. В литературе приводятся данные [7] о том, что отбор проб газов для диагностических мероприятий осуществляется в специальные «мешки», представляющие собой емкости из полимерных материалов с заданной газоплотностью. На наш взгляд, применение емкостей с гибкой оболочкой (газоплотных пакетов) является

перспективным направлением диагностического обеспечения высоковольтного электрооборудования, так как в этом случае достигаются меньшие эксплуатационные расходы за счет малой массы, а также удобство при отборе пробы. Ранее [6] рассматривалась возможность применения одноразовых пробоотборных устройств с гибкой оболочкой не только для транспортировки проб газов, но и для проб жидких диэлектриков (в частности трансформаторного масла). При применении пробоотборных емкостей с гибкой оболочкой основная задача заключается в обеспечении сохранности пробы по ее количеству и составу, т. е. обеспечение представительности пробы. Истечение компонентов пробы из герметичных пробоотборных емкостей в общем случае происходит в результате диффузионных процессов. При этом проницаемость материала оболочек пробоотборных емкостей является важнейшим параметром, определяющим срок сохраняемости пробы.

В работе [6] при помощи математического моделирования проведена оценка изменения концентрации газов в пробе трансформаторного масла с учетом различных факторов, ухудшающих пробу. Такими факторами являются: дефекты в алюминиевом (барьерном) слое, диффузия газов через сварной полимерный шов, диффузия газов через узел отбора пробы. Оценка времени хранения без потери представительности пробы с учетом утечки газов через дефект в металлическом слое диаметром 100 мкм дали времена, значительно превышающие разумные сроки хранения пробы ($2 \cdot 10^5$ лет). Стоит отметить, что утечкой газов через дефект в барьерном слое можно пренебречь, поскольку поток будет незначительным, даже если в стенке будут десятки, сотни отверстий диаметром до 100 мкм. Оценка времени хранения пробы с учетом диффузии водорода (газа с наименьшей молекулой) через сварной шов дала значение около одного года, учет диффузии через узел отбора пробы с силиконовым уплотнением можно пренебречь.

Применение пробоотборных устройств в эксплуатации будет сопровождаться воздействиями, снижающими сохранность пробы (перепады температуры, вибрация и др.). К тому же стоит отметить, что при математическом моделировании принимается ряд допущений и неточностей, к примеру, неизвестно количество дефектов в алюминиевом слое. Поэтому актуальной является экспериментальная проверка сохранности проб.

Целью настоящей работы является проведение экспериментальных исследований сохранности проб трансформаторного масла в пробоотборных устройствах с гибкой оболочкой.

1. Методика проведения эксперимента

Пробоотборное устройство с гибкой оболочкой (рис. 1) представляет собой емкость, состоящую из трехслойного материала (полиэтилен+алюминиевая фольга+полипропилен) с широкими сварными швами. Толщина полимерных слоев составила ~50 мкм, а барьерного слоя ~10 мкм. Ширина сварного шва 5...7 мм. В верхней части пробоотборного устройства приварена горловина с наконечником луер-лок. Наконечник луер-лок соединяется с медицинской иглой, специализированными кранами «Элхром», что дает возможность отбора проб ТМ, практически не изменяя стандартной методики [7].

Проведение испытаний заключалось в следующем. Трансформаторное масло ГК подвергалось дегазации с последующим насыщением тремя диагностическими газами (водород, метан, этан). После подготовки масла пробоотборные устройства заполнялись и отбирались первые (исходные) пробы для газового анализа. Спустя интервалы времени (1, 2, 4, 6 недель) отбирались последующие пробы масла.

Рис. 1 – Одноразовое пробоотборное устройство
 Fig. 1 – The disposable sampler



2. Результаты

Результаты газового анализа за 6 недель представлены на рис. 2.

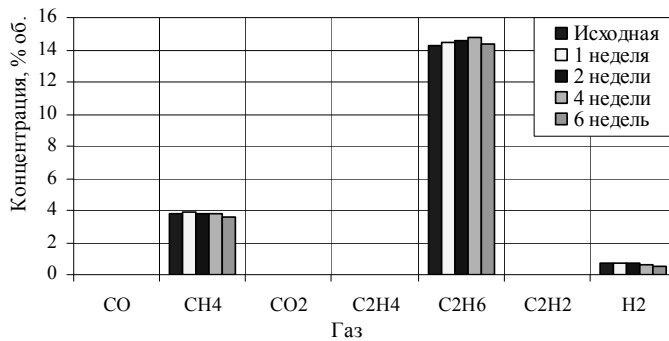


Рис. 2 – Изменение концентрации газов в ПУ с гибкой оболочкой за 1, 2, 4, 6 недель

Fig. 2 – The gas concentration in the sampler after 1, 2, 4, 6 weeks

Анализируя изменения концентраций газов, можно сказать, что с течением времени они изменяются незначительно. Поскольку ошибка определения концентраций растворенных газов значительна только вблизи предела чувствительности хроматографического метода, а в настоящей работе концентрация каждого из трех газов превышает на несколько порядков предел обнаружения хроматографа (см. таблицу) [8], то ошибку в определении концентраций можно исключить.

Таблица / Table

**Предел обнаружения определяемых в масле газов
 The detection limit of the gas concentration in transformer oil**

№ п/п	Газы	Предел обнаружения	
		ppm	% об.
1	Водород	5	0,00050
2	Метан, этилен, этан	1	0,00010
3	Ацетилен	0,5	0,00005
4	Оксид и диоксид углерода	20	0,00200
5	Кислород, азот	500	0,05000

Заключение

Таким образом, экспериментально показана сохранность проб трансформаторного масла в пробоотборных устройствах с гибкой оболочкой в течение 6 недель. Это дает основание утверждать, что одноразовые пробоотборные устройства с гибкой оболочкой на металл-полимерной основе пригодны для использования в диагностике электрооборудования с бумажно-масляной изоляцией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дарьян Л.А. Научные основы физико-химической диагностики высоковольтного маслонаполненного электрооборудования с изоляцией конденсаторного типа: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.12. – Новосибирск, 2009. – 437 с.
2. Darian L.A., Sung J.S. Influence of the gas tight samplers of Insulating oil on the accuracy of GC analysis // High Voltage Engineering: Proceedings of the 13th International Symposium on High Voltage Engineering, Delft, Netherlands, 25–29 August 2003 / ed. by J. Smit. – Rotterdam: Millpress, 2003. – ISBN 90-77017-79-8.
3. Дарьян Л.А., Коробейников С.М. Анализ качества устройства отбора проб, применяемых для хроматографического анализа газов, растворенных в изоляционных жидкостях // Электричество. – 2006. – № 12. – С. 62–64.
4. Дарьян Л.А., Бушмина Н.В. Оптимизация отбора проб из маслонаполненного электрооборудования // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2012. – № 2. – С. 82–86.
5. Трансформатор с элегазовой изоляцией [Электронный ресурс] // TOSMA. – URL: http://www.tosma.ru/docs/git_catalog_rus.pdf (дата обращения: 06.04.2016).
6. Дарьян Л.А., Коробейников С.М., Бычков А.Л. Моделирование утечки газов из пробоотборных емкостей с гибкой оболочкой // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2013. – № 1. – С. 28–31.
7. ГОСТ Р МЭК 60475–2013. Жидкости изоляционные. Отбор проб. – Введ. 2014–01–01. – М.: Стандартинформ, 2014.
8. СТО 56947007-29.180.010.094–2011. Методические указания по определению содержания газов, растворенных в трансформаторном масле / ОАО «Федеральная сетевая компания единой энергетической системы». – Введ. 02.06.2011. – М.: ФСК ЕЭС, 2011.

EXPERIMENTAL STUDY OF TRANSFORMER OIL SAMPLE SAFETY IN A SAMPLER WITH A FLEXIBLE SHELL

Bychkov A.L.¹, Korobeynikov S.M.¹, Darian L.A.²

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

²CJSC “Technical Inspection of UES”, Moscow, Russia

Accuracy of a physical and chemical analysis of oil-filled high voltage equipment depends on the sampler reliability. Earlier it was proposed to use boxes with multilayer metal-plastic flexible shells as samplers. In this paper the results of experimental studies of the transformed oil sample safety using such a sampler are presented. It was demonstrated that the concentration of dissolved gases did not change on storage during six weeks.

Keywords: diagnostics high voltage oil-filled equipment; sampler; flexible shell, safety; gases; leakage.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-15-20

REFERENCES

1. Darian L.A. *Nauchnye osnovy fiziko-khimicheskoi diagnostiki vysoko-vol'nogo maslonapolnennogo elektrooborudovaniya s izolyatsiei kondensatornogo tipa*. Diss. dokt. tekhn. nauk [The basement of physical technical diagnostics of high voltage oil filled equipment with the capacitive insulation. Dr. eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2009. 437 p.

2. Darian L.A., Sung J.S. Influence of the gas tight samplers of Insulating oil on the accuracy of GC analysis. *High Voltage Engineering: Proceedings of the 13th International Symposium on High Voltage Engineering*, Delft, Netherlands, 25–29 August 2003. ISBN 90-77017-79-8
3. Darian L.A., Korobeinikov S.M. Analiz kachestva ustroystva otbora prob, primenyaemykh dlya khromatograficheskogo analiza gazov, rastvorenykh v izolya-tsionnykh zhidkostyakh [Analysis of quality of samplers used for DGA]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2006, no. 12, pp. 62–64. (In Russian)
4. Darian L.A., Bushmina N.V. Optimizatsiya otbora prob iz maslonapolnennogo elektrooborudovaniya [Optimization of sampling from oil-filled equipment]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2012, no. 2, pp. 114–118.
5. *Transformator s elegazovoi izolyatsiei* [Gas insulated transformer]. Available at: http://www.tosma.ru/docs/git_catalog_rus.pdf (accessed 06.04.2016)
6. Darian L.A., Korobeinikov S.M., Bychkov A.L. Modelirovanie utechki gazov iz probotobnykh emkosti s gibkoi obolochkoi [Modeling of gas leakage from sampler with flexible shell]. *ELEKTRO. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost'*, 2013, no. 1, pp. 28–31.
7. *GOST R MEC 60475–2013. Zhidkosti izolyatsionnye. Otor prob* [State Standard R IEC 60475–2013. Insulating liquids. Sampling]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. (In Russian)
8. *STO 56947007-29.180.010.094–2011. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu sodержaniya gazov, rastvorenykh v transformatornom masle* [Standard Organization 56947007-29.180.010.094–2011. Recommendation for DGA in transformer oil]. Moscow, FSK UES Publ., 2011.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Бычков Александр Леонидович – родился в 1988 году, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Безопасность труда» Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: техника высоких напряжений. Опубликовано 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: aleksandr_nstu@ngs.ru).

Bychkov Aleksandr Leonidovich (b. 1988) – PhD, Senior Lecturer at the Industrial Safety Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on high voltage engineering. He is author of 10 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: aleksandr_nstu@ngs.ru).



Коробейников Сергей Миронович – родился в 1950 году, д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой «Безопасность труда» Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электрофизика и техника высоких напряжений. Опубликовано более 90 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: korobeinikov@corp.nstu.ru).

Korobeinikov Sergey Mironovich (b. 1950) – Doctor of Sciences (Phys.&Math), Professor, Head of Industrial Safety department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on electro-physics and high voltage engineering. He is author of more than 90 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: korobeinikov@corp.nstu.ru).



Дарьян Леонид Альбертович – родился в 1959 году, д-р техн. наук, заместитель директора ЗАО «Техническая инспекция ЕЭС». Область научных интересов: техника высоких напряжений. Опубликовано более 50 научных работ. (Адрес: Россия, 109240, Москва, Славянская площадь, д. 2/5, стр. 5. E-mail: ldarian@rambler.ru).

Darian Leonid Albertovich (b. 1959) – Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Deputy Director of CJSC «Technical Inspection UES». His research interests are currently focused on high voltage engineering. He is author of more than 50 scientific papers. (Address: block. 5, 2/5, Slavyanskaya Sq, Moscow, 109240, Russia. E-mail: ldarian@rambler.ru).

*Статья поступила 05 октября 2015 г.
Received October 05, 2015*

To Reference:

Bychkov A.L., Korobeynikov S.M., Darian L.A. Eksperimental'noe issledovanie sokhrannosti prob transformatornogo masla v probotobornom ustroistve s gibkoi obolochkoi [Experimental study of transformer oil sample safety in a sampler with a flexible shell]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 1 (30), pp. 15–20. doi: 10.17212/1727-2769-2016-1-15-20

УДК 621.341.572

АЛГОРИТМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ ИНВЕРТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ В СИГНАЛЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНВЕРТОРОМ ТОКА

А.Г. Волков, Г.С. Зиновьев

Новосибирский государственный технический университет

В данной работе рассматривается алгоритм преобразования сигналов управления, в котором используются ранее сгенерированные сигналы управления инвертором напряжения, для дальнейшего управления инвертором тока или многозонным инвертором тока. Наиболее распространенной топологией инверторов для систем генерирования электрической энергии переменного тока является трехфазный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией. Однако в связи с характером топологии данный тип преобразователя имеет свои недостатки, такие как высокие значения dv/dt и di/dt , наличие электролитического конденсатора, имеющего ограничения по сроку службы и предельно допустимой температуре, а также плохую защиту от аварийных токов при коротком замыкании в нагрузке. Альтернативной топологией инвертору напряжения является инвертор тока. Он имеет преимущества по ограничению аварийных токов при коротком замыкании на стороне потребителя, вследствие питания от источника тока, надежный узел аккумуляирования энергии звена постоянного тока и возможность повышения выходного напряжения. Получены аналитические соотношения, которые связывают состояния ключей инвертора напряжения и инвертора тока, и разработана логическая схема, определяющая моменты времени, когда должны быть применены необходимые нулевые состояния для минимизации частоты переключения силовых ключей и потерь на их переключения. Результаты исследований подтверждены имитационным моделированием системы управления в программном обеспечении компьютерного моделирования силовых схем PowerSIM, а также экспериментальными исследованиями инвертора тока с использованием микропроцессорной системы управления на базе программируемой логической интегральной схемы.

Ключевые слова: инвертор тока, инвертор напряжения, алгоритм управления, программируемая логическая интегральная схема, алгоритм преобразования управления.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-21-33

Введение

В данной работе рассматривается одна из стратегий модуляции для инвертора тока с использованием состояний ключей инвертора напряжения. Инвертор напряжения обладает большими dv/dt в выходных фазных напряжениях, что приводит к таким проблемам, как увеличение потерь в силовых ключах, акустическим шумам в нагрузке, деградация изоляции питающегося от инвертора двигателя, вследствие скачков напряжения и воздействия электромагнитных помех [1]. В то же время исследованные достоинства алгоритмов ШИМ управления инверторами напряжения привлекают внимание разработчиков алгоритмов ШИМ управления инверторов тока [2–6].

Целью исследования является создание алгоритма преобразования ранее сгенерированных сигналов управления инвертором напряжения в сигналы управле-

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, государственное задание № 8.1327.2014К.

ния инвертором тока с минимизацией потерь на переключения транзисторов силовой схемы. Поставленными задачами являются получение аналитических соотношений, связывающих состояния ключей инвертора напряжения и инвертора тока, разработка логической схемы, определяющей моменты времени, когда должны быть применены необходимые нулевые состояния, а также сравнение полученных результатов посредством имитационного моделирования и натурного эксперимента.

Очевидно, что любой инвертор тока может управляться любой стратегией модуляции инвертора напряжения, если активные состояния силовых ключей, созданные при помощи модулятора, преобразуются в стационарные векторы и комбинации переключения, связанные с этими векторами [7–9]. В разработке данного алгоритма управления необходимо определить, как сигналы управления транзисторами в инверторе тока должны быть связаны с сигналами управления трехфазным инвертором напряжения.

1. Анализ коммутационных функций инвертора напряжения

В соответствии с законом Кирхгофа для напряжения и тока, инвертор напряжения ограничен в том смысле, что оба ключа в одной и той же стойке не могут быть включены в одно и то же время, так как это привело бы к замыканию входного конденсатора постоянного тока. Таким образом, характер двух ключей в одной и той же стойке комплементарный. В соответствии с рис. 1

$$S_{ap} + S_{an} = 1,$$

$$S_{bp} + S_{bn} = 1,$$

$$S_{cp} + S_{cn} = 1.$$

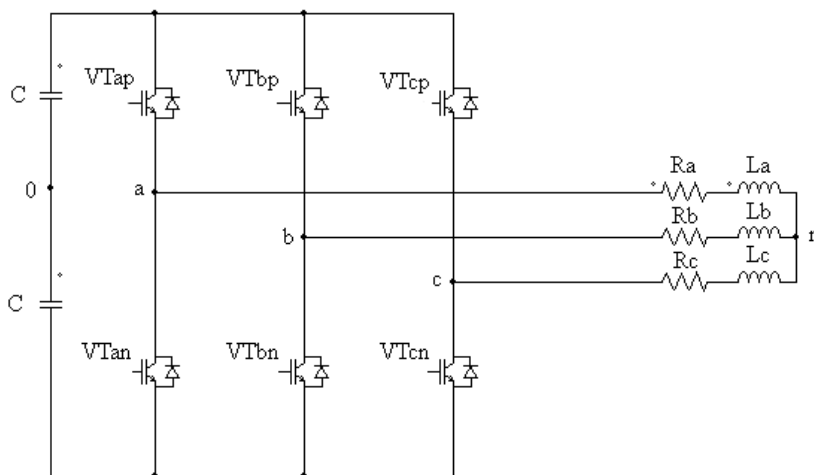


Рис. 1 – Схема трехфазного инвертора напряжения

Fig. 1 – Scheme of a three-phase Voltage Source Inverter

В табл. 1 показаны возможные коммутационные состояния для силовой схемы инвертора напряжения. Состояния от V1 до V6 являются активными состояниями, а состояния V0 и V7 являются нулевыми. Из табл. 1 видно, что инвертор напря-

жения имеет шесть активных состояний и два нулевых состояния, создающие в общей сложности восемь возможных состояний. Уравнение напряжения фаз сбалансированной трехфазной нагрузки выражается через коммутационные функции и входное напряжение постоянного тока V_{dc} , которые задаются в виде:

$$\frac{V_{dc}}{2}(S_{ap} - S_{an}) = v_{an} + v_{no}, \quad (1)$$

$$\frac{V_{dc}}{2}(S_{bp} - S_{bn}) = v_{bn} + v_{no}, \quad (2)$$

$$\frac{V_{dc}}{2}(S_{cp} - S_{cn}) = v_{cn} + v_{no}, \quad (3)$$

где v_{an} , v_{bn} , v_{cn} – фазные напряжения нагрузки, а напряжение v_{no} это напряжение между нейтральной точкой нагрузки и средней точкой конденсаторов.

Таблица 1 / Table 1

Коммутационные состояния в трехфазном инверторе напряжения
Switching states in a three-phase voltage source inverter

	Состояние	Sap	Sbp	Scp	San	Sbn	Scn
Активные Состояния	V1	0	0	1	1	1	0
	V2	0	1	0	1	0	1
	V3	0	1	1	1	0	0
	V4	1	0	0	0	1	1
	V5	1	0	1	0	1	0
	V6	1	1	0	0	0	1
Нулевые Состояния	V0	1	1	1	0	0	0
	V7	0	0	0	1	1	1

Суммируя выражения (1–3), получаем

$$\frac{V_{dc}}{2}(S_{ap} + S_{bp} + S_{cp} - S_{an} - S_{bn} - S_{cn}) = v_{an} + v_{bn} + v_{cn} + 3v_{no}.$$

Так как трехфазные напряжения сбалансированы, то

$$\frac{V_{dc}}{2}(2S_{ap} - S_{bp} - S_{cp}) = v_{an},$$

$$\frac{V_{dc}}{2}(2S_{bp} - S_{ap} - S_{cp}) = v_{bn},$$

$$\frac{V_{dc}}{2}(2S_{cp} - S_{bp} - S_{ap}) = v_{cn}.$$

Коммутационные функции ключей в преобразователе могут быть аппроксимированы в виде суммы основополагающей компоненты и компоненты постоян-

ного тока с использованием разложения в ряд Фурье, следовательно, аппроксимированные коммутационные функции могут быть заданы как

$$S_{ap} = \frac{1}{2}(1 + M_{ap}),$$

$$S_{bp} = \frac{1}{2}(1 + M_{bp}),$$

$$S_{cp} = \frac{1}{2}(1 + M_{cp}),$$

где M_{ap} , M_{bp} , M_{cp} представляют модулирующие сигналы. Из уравнений (1)–(3) модулирующие сигналы могут быть выражены как

$$M_{ap} = \frac{2 \cdot v_{an}}{V_{dc}} + \frac{2 \cdot v_{no}}{V_{dc}},$$

$$M_{bp} = \frac{2 \cdot v_{bn}}{V_{dc}} + \frac{2 \cdot v_{no}}{V_{dc}},$$

$$M_{cp} = \frac{2 \cdot v_{cn}}{V_{dc}} + \frac{2 \cdot v_{no}}{V_{dc}}.$$

В соответствии с законом Кирхгофа для напряжения и тока, в отношении инвертора тока является обязательным то, что только один ключ в верхней и один ключ в нижней части преобразователя должны быть включены одновременно, иначе звено постоянного тока на входе инвертора будет закорочено.

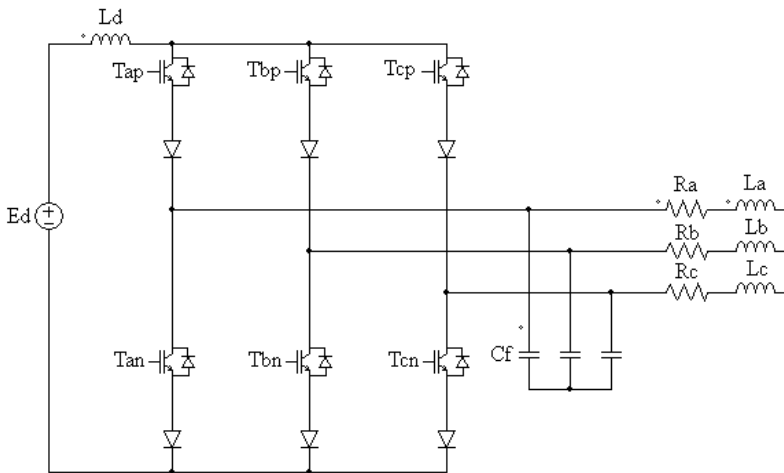


Рис. 2 – Схема трехфазного инвертора тока

Fig. 2 – Scheme of a three-phase Current Source Inverter

В табл. 2 предложены возможные состояния переключений для инвертора тока. Состояния [I1...I6], являются активными состояниями, а I7, I8, I9 называются нулевыми состояниями. Таким образом, из приведенной выше таблицы можно утверждать, что существует шесть активных состояний силовой схемы и три

нулевых состояния, которые составляют в общей сложности девять состояний для инвертора тока. Активные состояния инвертора тока используются для синтеза импульсов выходных токов, а три нулевых состояния используются для формирования бестоковых пауз в ШИМ импульсах токов, на выходе инвертора тока.

Таблица 2 / Table 2

Состояние ключей в трехфазном инверторе тока
Switching states in a three-phase current source inverter

	State	Tap	Tbp	Tcp	Tan	Tbn	Tcn
Активные состояния	11	1	1	0	0	0	0
	12	0	1	1	0	0	0
	13	0	0	1	1	0	0
	14	0	0	0	1	1	0
	15	0	0	0	0	1	0
	16	1	0	0	0	0	1
Нулевые состояния	17	1	0	0	1	0	0
	18	0	1	0	0	1	0
	19	0	0	1	0	0	1

2. Алгоритм распределения сигналов управления инвертора напряжения

Используя табл. 1 и 2 и объединяя состояния инвертора напряжения [V1...V8] определенным образом, могут быть получены желаемые состояния для инвертора тока [I1...I9]:

$$c1 = V_1 + V_3.$$

Принимая:

$$\overline{c1} = \overline{V_1 + V_3},$$

$$\overline{c1} = \overline{S_{cp}S_{an}S_{bn} + S_{bp}S_{cp}S_{an}},$$

$$\overline{c1} = \overline{S_{cp}S_{an} \cdot (S_{bn} + S_{bp})}.$$

Используя тождество:

$$\overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B},$$

$$\overline{A + B} = \overline{A} \cdot \overline{B},$$

$$\overline{c1} = \overline{S_{cp}S_{an} \cdot (S_{bn} + S_{bp})} = \overline{S_{cp}S_{an}} + \overline{S_{bn}S_{bp}} = \overline{S_{cn}} \cdot \overline{S_{ap}} + \overline{S_{bn}S_{bp}}.$$

Используя свойство:

$$\overline{\overline{A \cdot B}} = A \cdot B,$$

$$c1 = S_{cn}S_{ap} + S_{ap}S_{an}.$$

Здесь, первое слагаемое соответствует активному состоянию, а второй член соответствует нулевому состоянию в инверторе тока. Как видно из этого выражения, любое сочетание состояний инвертора напряжения приводит к комбинации

активного состояния инвертора тока и нулевого состояния. Состояния истинности для выражений приведены в табл. 3.

Таблица 3 / Table 3

**Получение состояний инвертора тока из доступных состояний
инвертора напряжения**
**Obtaining states for current source inverter from available states
of voltage source inverter**

Sap	Sbp	Scp	San	Sbn	Scn	c1	c2	c3	c4	c5	c6
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0
0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0
0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0
1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1
1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1
1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Остальные состояния инвертора тока представлены как

$$c2 = S_{an}S_{bp} + S_{cp}S_{cn},$$

$$c3 = S_{an}S_{bp} + S_{bp}S_{bn},$$

$$c4 = S_{cp}S_{an} + S_{bp}S_{bn},$$

$$c5 = S_{cp}S_{bn} + S_{ap}S_{an},$$

$$c6 = S_{bn}S_{ap} + S_{cp}S_{cn}.$$

Из табл. 3 видно, что нет состояний, при которых два ключа в верхней части преобразователя или нижней включены одновременно. Это означает, что только один ключ в верхней части преобразователя и один ключ в нижней включены одновременно. Нулевые состояния инвертора напряжения не отображаются в нулевых состояниях инвертора тока при использовании вышеуказанного алгоритма, так как произведение двух нулевых состояний всегда равно нулю.

Существует необходимость введения в инверторе тока нулевых состояний в сочетании с активными состояниями. Таким образом, накладываются дополнительные условия минимизации потерь на переключение путем сокращения числа переключений силовых ключей и поддержание сбалансированного использования полупроводниковых элементов [10]. Это также должно обеспечивать симметрию в выходных коммутируемых токах для минимизирования высших гармоник. Для выполнения вышеуказанных требований разработана логическая схема, которая обнаруживает времена, когда должны быть применены нулевые состояния. Эта логическая схема определяет нулевое состояние, когда все полупроводниковые элементы в верхней и /или нижней части выключены. Управляя силовыми ключами

чами в одной и той же стойке общим сигналом, который будет называться импульсом перекрытия, и будет использоваться для распределения нулевых состояний. Инвертор напряжения имеет два нулевых состояния, которые должны быть приведены к трем нулевым состояниям инвертора тока за один период времени. Нулевые состояния в инверторе тока означают замыкание одной стойки любой фазы. Это закорачивание входа инвертора должно быть равномерно распределено для синтеза сбалансированных выходных токов инвертора. Такое распределение нулевых состояний осуществляется при помощи определения абсолютного максимума трех линейных опорных сигналов.

Рис. 3 показывает три модулирующих сигнала, абсолютные максимумы модулирующих сигналов и три сигнала распределения фаз. Видно, что, когда M_{ab} максимален, тогда S_{sa} будет принимать единичное значение, когда M_{bc} максимален, тогда S_{sb} будет равняться единице, когда M_{ca} максимален, тогда S_{sc} будет принимать единичное значение.

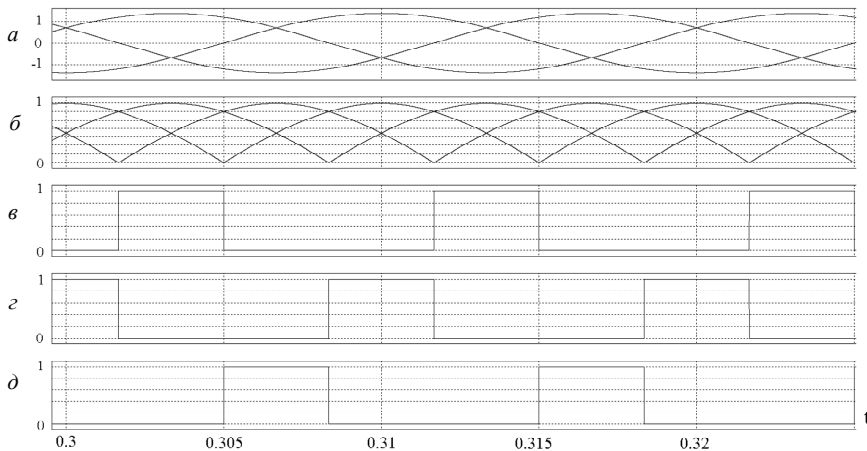


Рис. 3 – Распределение сигналов:

a – три модулирующих сигнала; $б$ – абсолютные максимумы модулирующих сигналов; $в$ – фаза a распределения сигнала S_{sa} ; $г$ – фаза b распределения сигнала S_{sb} ; $д$ – фаза c распределения сигнала S_{sc}

Fig. 3 – Signals distribution:

a – three modulating signals; b – the absolute maximum of modulating signals; c – the phase a signal distribution S_{sa} ; d – the phase b distribution of signal S_{sb} ; e – phase c signal distribution S_{sc}

3. Результаты имитационного моделирования и эксперимента

Сигналы широтно-импульсной модуляции, полученные с выхода модулятора, преобразуются для того, чтобы сгенерировать сигналы табл. 3. Таким образом, V1 по V6 являются выходами логических элементов, соответствующих состояниям инвертора напряжения. Расчет абсолютного максимума модулирующих сигналов осуществляется блоком импульсов перекрытия и формирует сигналы S_{sa} , S_{sb} , S_{sc} . На рис. 4 показана практическая реализации логической схемы в пакете имитационного моделирования PowerSIM. Сигналы управления далее передаются через комбинации логических элементов И, ИЛИ для реализации стратегии модуляции, описанной выше. Итоговые импульсы управления $[T_{ap}...T_{cn}]$ подаются на силовые ключи инвертора тока.

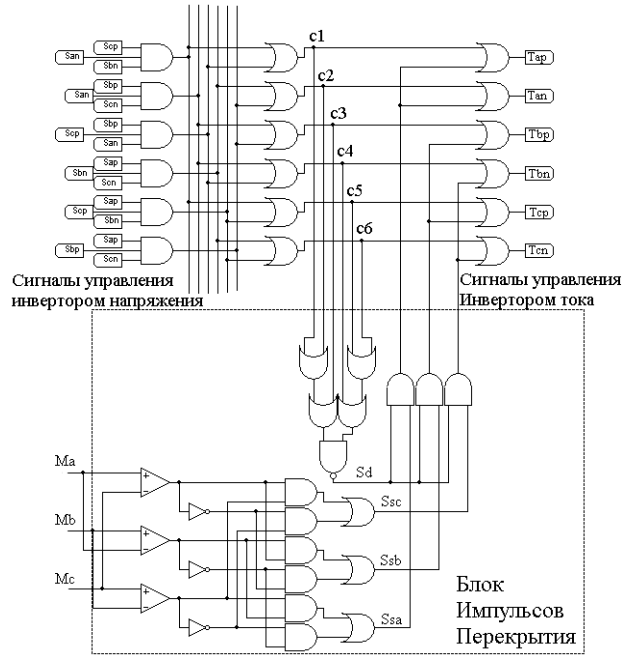


Рис. 4 – Практическая реализация логической схемы в пакете имитационного моделирования

Fig. 4 – Practical implementation of logic circuit in the software for imitating modeling

На рис. 5: *a* – показан сигнал управления инвертором напряжения; *b* – функция коммутации $C1$; *в* – сигнал распределения импульсов S_{sa} , который соответствует максимальному линейному модулирующему сигналу M_{ab} ; *г* – нулевые состояния во время работы инвертора тока; *д* – импульсы управления для верхнего силового ключа фазы *a*.

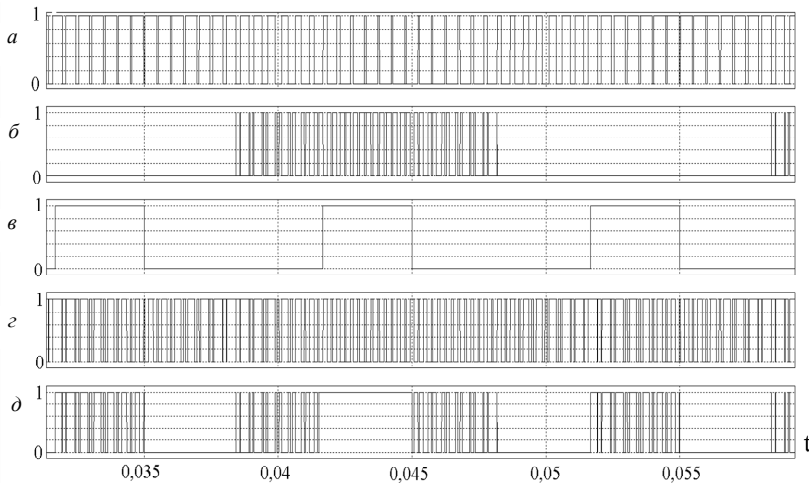


Рис. 5 – Результаты имитационного моделирования

Fig. 5 – The results of imitating modeling

На рис. 6, а, б показаны экспериментально полученные итоговые импульсы управления для верхнего и нижнего силовых ключей фазы а соответственно, на рис. 6, в представлен выходной ток фазы а инвертора.

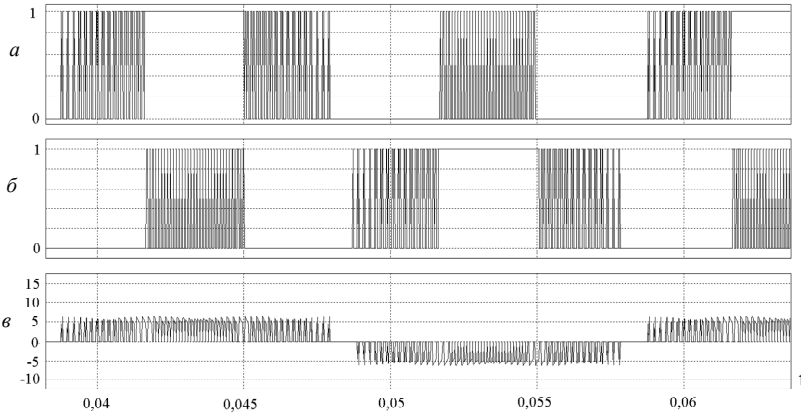


Рис. 6 – Результаты имитационного моделирования
 Fig. 6 – The results of imitating modeling for current source inverter

Физический эксперимент заключался в реализации алгоритма преобразования сигналов управления инвертором напряжения в сигналы управления инвертором тока в микропроцессорной системе управления трехфазным инвертором тока на базе программируемой логической интегральной схемы. На рис. 7 представлена внутренняя структура программируемой логической интегральной схемы, используемой в эксперименте, где M_a, M_b, M_c – модулирующие сигналы, V_{ref} – опорный сигнал, а сигнал clk – сервисный сигнал тактирования.

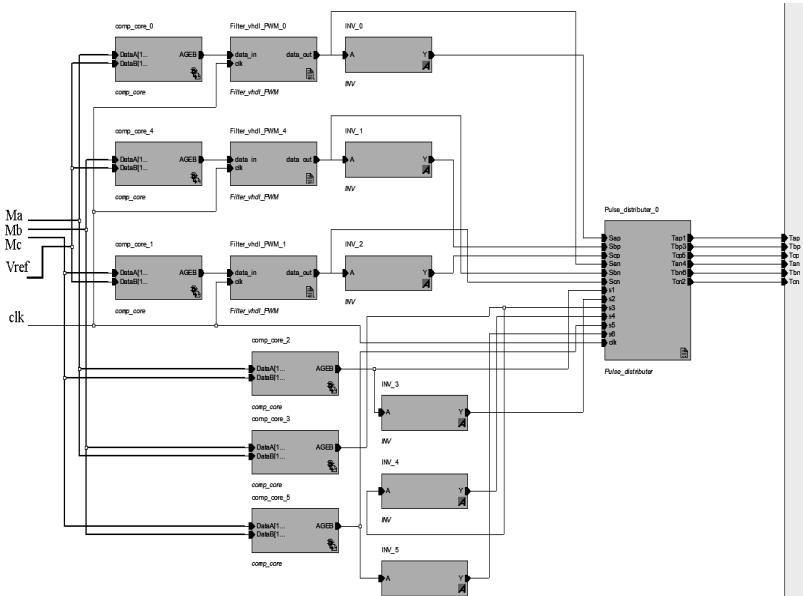


Рис. 7 – Результаты эксперимента. Структура программируемой логической интегральной схемы
 Fig. 7 – Experimental results. The structure of field-programmable gate array

На рис. 8 и 9 приведены результаты физического эксперимента, а именно: коммутационная функция c_1 , сигнал распределения импульсов перекрытия S_{sa} , нулевые состояния инвертора тока S_d , сигнал управления верхним транзистором фазы a T_{ap} .

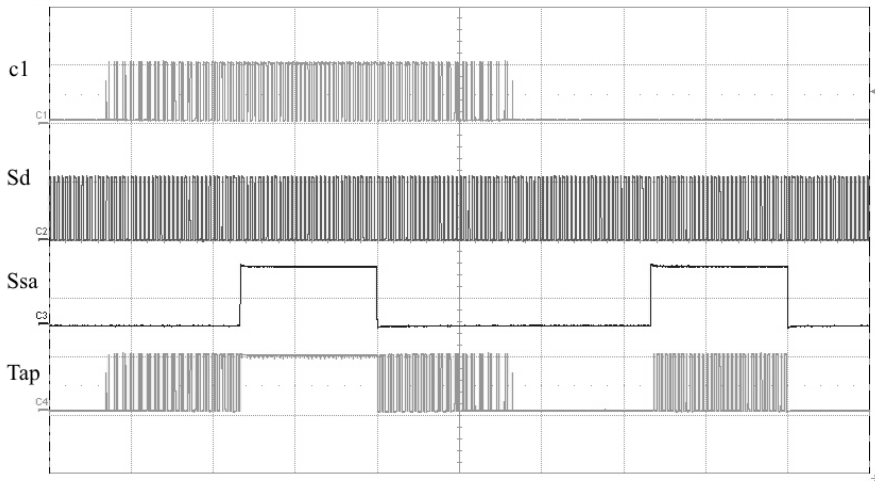


Рис. 8 – Результаты эксперимента. Временные диаграммы

Fig. 8 – Experimental results. Timing diagrams

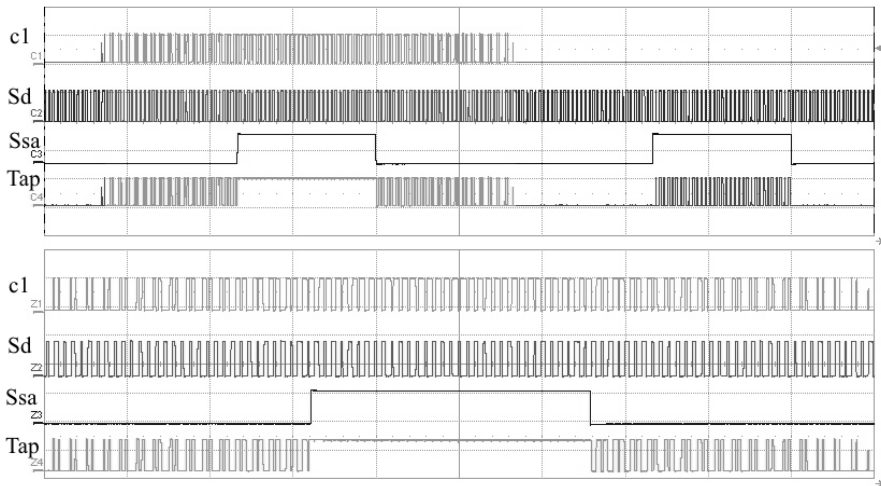


Рис. 9 – Результаты эксперимента. Временные диаграммы с увеличенной областью

Fig. 9 – Experimental results. Timing diagrams with zoomed area

Заключение

Разработан алгоритм преобразования сигналов управления инвертором напряжения для управления инвертором тока. Получены аналитических соотношения, которые связывают ранее сгенерированные состояния ключей инвертора напряжения и состояния ключей инвертора тока, разработана логическая схема, опре-

деляющая моменты времени, в которых должны быть применены необходимые нулевые состояния с минимизацией потерь на переключения силовых ключей.

Проведено сравнение результатов компьютерного моделирования алгоритма преобразования и физического эксперимента с использованием микропроцессорной системы управления на базе программируемой логической интегральной схемы АЗР250 семейства PROASIC3 производителя Microsemi, которое в целом подтвердило результаты, полученные в ходе анализа, и корректность полученных аналитических соотношений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зиновьев Г.С.** Основы силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 672 с.
2. Analysis of electromagnetic processes in the three phase multizone current source inverter / A. Volkov, G. Zinoviev, D. Makarov, A. Shtein, M. Balagurov, A. Sidorov // The 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2014), Novosibirsk, 30 June – 4 July 2014. – Novosibirsk, 2014. – P. 415–418. – doi: 10.1109/EDM.2014.6882561.
3. **Hombu M., Ueda S., Ueda A.** A current source GTO inverter with sinusoidal output voltage and current // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1985. – Vol. 21, N 2. – P. 1192–1198. – doi: 10.1109/TIA.1985.349523.
4. **Hombu M., Ueda S., Ueda A.** A current source GTO inverter with sinusoidal input and outputs // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1987. – Vol. 23, N 2. – P. 247–255. – doi: 10.1109/TIA.1987.4504899.
5. **Nonaka S., Neba Y.** New GTO current source inverter with pulsewidth modulation control techniques // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1986. – Vol. 22, N 4. – P. 666–672. – doi: 10.1109/TIA.1986.4504776.
6. **Nonaka S., Neba Y.** A PWM GTO current source converter-inverter system with sinusoidal inputs and outputs // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1989. – Vol. 25, N 1. – P. 76–85. – doi: 10.1109/28.18872.
7. A current source PWM inverter with actively commutated SCR's / A. Bendre, I. Wallace, J. Nord, G. Venkataramanan // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2002. – Vol. 17, N 4. – P. 461–468. – doi: 10.1109/TPEL.2002.800999.
8. Multilevel current source inverter topologies based on the duality principle / J. Bao, W. Bao, S. Wang, Z. Zhang // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2004. – Vol. 17, N 4. – P. 322–326. – doi: 10.1109/APEC.2010.5433367.
9. Boost current multilevel inverter and its application on single phase grid connected photovoltaic system / P.G. Barbosa, H.A.C. Braga, M.C. Barbosa, E.C. Teixeira // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2006. – Vol. 21, N 4. – P. 1116–1124. – doi: 10.1109/TPEL.2006.876784.
10. **Li R., Chung H.S., Chan T.K.M.** An active modulation technique for single-phase grid connected CSI // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2007. – Vol. 22. – P. 1373–1380. – doi: 10.1109/TPEL.2007.900488.
11. **Klumpner C., Blaaajerg F.** Using reverse blocking IGBTs in power converters for adjustable-speed drives // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2006. – Vol. 42, N 3. – P. 807–816. – doi: 10.1109/TIA.2006.872956.
12. **Joos G., Moschopoulos G., Ziogas P.D.** A high performance current source inverter // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1993. – Vol. 8, N 4. – P. 571–579. – doi: 10.1109/63.261029.

THE ALGORITHM OF CONVERTING VOLTAGE SOURCE INVERTER CONTROL SIGNALS INTO CURRENT SOURCE INVERTER CONTROL SIGNALS

Volkov A.G., Zinoviev G.S.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

This paper considers one of the methods for controlling the current source inverter with respect to multi-zone three-phase current source converters that uses previously generated control signals for the voltage source inverter. The most widespread topology of DC-AC converters of electric power generation systems is three-phase voltage source inverters with pulse width modulation. However, due to the nature of this topology, this type of converters has some disadvantages, such as high values of dv/dt and di/dt , the presence of an electrolytic capacitor which has a maximum permissible temperature limit as well as a poor short-circuit protection. An alternative topology for the voltage source inverter is the current source inverter. It has such advantages as a good short-circuit protection due to the smooth reactor at the converter input, reliable energy storage in the DC bus, and the possibility of increasing the output voltage. A technique for converting these signals for the three-phase current source inverter to minimize switching losses in power switches is described. The analysis results are verified by imitating modeling of control systems using the PowerSIM power circuit computer simulation software as well as experimental investigations of the current source inverter of the microprocessor control system based on the field-programmable gate array.

Keywords: current source inverter, voltage source inverter, control algorithm, field-programmable gate array, control conversion algorithm.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-21-33

REFERENCES

1. Zinoviev G.S. *Osnovy silovoi elektroniki* [Basics of power electronics]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2009. 672 p.
2. Volkov A., Zinoviev G., Makarov D., Shtein A., Balagurov M., Sidorov A. Analysis of electromagnetic processes in the three phase multizone current source inverter. *15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2014)*, Novosibirsk, Russia, 30 June – 4 July 2014, pp. 415–418. doi: 10.1109/EDM.2014.6882561
3. Hombu M., Ueda S., Ueda A. A current source GTO inverter with sinusoidal output voltage and current. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1985, vol. 21, no. 2, pp. 1192–1198. doi: 10.1109/TIA.1985.349523
4. Hombu M., Ueda S., Ueda A. A current source GTO inverter with sinusoidal input and outputs. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1987, vol. 23, no. 2, pp. 247–255. doi: 10.1109/TIA.1987.4504899
5. Nonaka S., Neba Y. New GTO current source inverter with pulsewidth modulation control techniques. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1986, vol. 22, no. 4, pp. 666–672. doi: 10.1109/TIA.1986.4504776
6. Nonaka S., Neba Y. A PWM GTO current source converter-inverter system with sinusoidal inputs and outputs. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1989, vol. 25, no. 1, pp. 76–85. doi: 10.1109/28.18872
7. Bendre A., Wallace I., Nord J., Venkataramanan G. A current source PWM inverter with actively commutated SCR's. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2002, vol. 17, no. 4, pp. 461–468. doi: 10.1109/TPEL.2002.800999
8. Bao J., Bao W., Wang S., Zhang Z. Multilevel current source inverter topologies based on the duality principle. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, vol. 17, no. 4, pp. 322–326. doi: 10.1109/APEC.2010.5433367
9. Barbosa P.G., Braga H.A.C., Barbosa M.C., Teixeira E.C. Boost current multilevel inverter and its application on single phase grid connected photovoltaic system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2006, vol. 21, no. 4, pp. 1116–1124. doi: 10.1109/TPEL.2006.876784

10. Li R., Chung H.S., Chan T.K.M. An active modulation technique for single-phase grid connected CSI. *IEEE Transactions on Power Electronic*, 2007, vol. 22, pp. 1373–1380. doi: 10.1109/TPEL.2007.900488
11. Klumpner C., Blaaajerg F. Using reverse blocking IGBTs in power converters for adjustable-speed drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2006, vol. 42, no. 3, pp. 807–816. doi: 10.1109/TIA.2006.872956
12. Joos G., Moschopoulos G., Ziogas P.D. A high performance current source inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1993, vol. 8, no. 4, pp. 571–579. doi: 10.1109/63.261029

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Волков Александр Геннадьевич – родился в 1988 году, младший научный сотрудник кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: автономные системы генерирования, многозонные электронные конверторы. Опубликовано 25 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: _bismark_@mail.ru)

Volkov Alexander Gennadievich (b. 1988) – a junior research fellow at the Electronics and Electrical Engineering Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on autonomous generation systems and multizone electronic converters. He is the author of 25 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: _bismark_@mail.ru).



Зиновьев Геннадий Степанович – д-р техн. наук, профессор кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: силовые полупроводниковые преобразователи. Опубликовано более 300 научных работ. (Адрес: 630073, Российская Федерация, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: genstep@mail.ru).

Zinoviev Gennady Stepanovich – Doctor of Sciences (Eng.), Professor at the Electronics and Electrical Engineering Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on power electronic converters. He is author of more than 300 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: genstep@mail.ru).

*Статья поступила 02 октября 2015 г.
Received October 02, 2015*

To Reference:

Volkov A.G., Zinoviev G.S. Algoritm preobrazovaniia signalov upravleniia invertorom napriazheniia v signaly upravleniia invertorom toka [The algorithm of converting voltage source inverter control signals into current source inverter control signals]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 1 (30), pp. 21–33. doi: 10.17212/1727-2769-2016-1-21-33

УДК 621.396.677

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИПОЛЬНЫХ ВОЗБУДИТЕЛЕЙ МНОГОЛУЧЕВЫХ ДИРЕКТОРНЫХ АНТЕНН

А.П. Горбачев, А.В. Шведова

Новосибирский государственный технический университет

Анализируется новый возбуждатель директорных антенн, представляющий собой диполь с центрально-концевым питанием. Данный возбуждатель характеризуется конечным углом отклонения максимума диаграммы направленности от перпендикуляра к оси обоих коллинеарных проводников. Такая реализация возбуждателя позволяет обеспечить хорошее согласование директорной антенны с питающим коаксиальным кабелем и реализовать конструкции с произвольным отклонением максимума диаграммы направленности от оси стрелы антенны в плоскости электрического вектора E . На основе метода наводимых электродвижущих сил получены уравнения для комплексного входного сопротивления возбуждателя. По результатам вычислений построены графики зависимости вещественной и мнимой составляющих комплексного входного импеданса диполя с центрально-концевым питанием от его относительной длины, которые использованы далее для формирования стартового облика облучателя с печатным делителем мощности для целей полноволнового моделирования и экспериментальных исследований. Численное моделирование параметров облучателя показало их хорошее совпадение с результатами измерений. Предлагаемый диполь с центрально-концевым питанием может найти применение не только в директорных антеннах, но и в фазированных антенных решетках, турникетных и кардиоидных излучателях, а также других многодипольных антенных системах.

Ключевые слова: диполь, диаграмма направленности, директорная антенна, комплексное входное сопротивление, электромагнитное поле.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-34-47

Введение

Известно, что дипольные директорные антенны широко применяются в беспроводных телекоммуникационных системах с линейной поляризацией радиоволн [1–8]. Недостатком таких антенн является тот факт, что направление максимума их излучения определяется их ориентацией антенной стрелы, на которой ортогонально ей крепятся диполи. Иными словами, до настоящего времени в отечественной литературе не описаны технические решения, позволяющие реализовать с одной директорной антенны (т.е. с одной конструктивно-сборочной единицы) несколько направлений максимумов излучения.

Между тем авторами данной работы недавно предложена новая вибраторная антенна [9], отличающаяся от классического диполя тем, что ее возбуждение осуществляется как с удаленного, так и со смежного конца двух коллинеарных цилиндрических проводников, реализуя так называемое центрально-концевое питание диполя (вибратора). Предложенная антенна, имея другую частотную характеристику сопротивления излучения, характеризуется конечным углом отклонения максимума диаграммы направленности от перпендикуляра к оси обоих коллинеарных проводников. Можно ожидать, что такая антенна, будучи радиочастотным облучателем соответствующих директоров (направителей), позволит

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания, код проекта 629.

реализовать директорную антенну с отклоненным от оси стрелы максимумом диаграммы направленности, что создаст благоприятные предпосылки к построению хорошо согласованных с источником сигнала многолучевых директорных антенн.

Цель работы: проанализировать дипольный излучатель с центрально-концевым питанием и оценить его пригодность для реализации возбуждателей хорошо согласованных многолучевых директорных антенн.

1. Диаграмма направленности дипольных возбуждателей с центрально-концевым питанием

Анализируемый возбуждатель содержит два коллинеарных (т. е. соосных, с общей осью z (позиция 1 на рис.1)) идентичных цилиндрических проводника 2 и 3 с радиусом a , смежные концы 4 и 5 которых расположены в непосредственной близости:

$$a \leq 0,01\lambda_c, \quad b \leq 0,05\lambda_c, \quad (1)$$

где λ_c – средняя длина волны рабочего диапазона частот $f_L \dots f_H$:

$$\lambda_c = 3 \cdot 10^8 / f_c, \quad \lambda_c = (f_L + f_H) / 2. \quad (2)$$

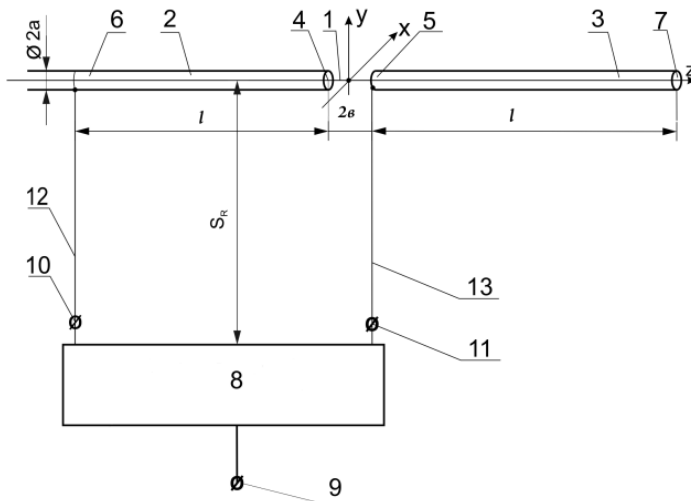


Рис. 1 – Дипольный излучатель с центрально-концевым питанием

Fig. 1 – The center-end-fed dipole radiator

Эти ограничения соответствуют классификации зазоров и диаметров проводников, принятой в области проволочных дипольных антенн [1]. Напряжения, питающие рассматриваемый возбуждатель, подаются как к смежному концу 5 проводника 3, так и к удаленному концу 6 проводника 2. Эти напряжения снимаются с выходов 10 и 11 двухканального равноамплитудного делителя мощности 8, ко входу 9 которого подключен питающий директорную антенну коаксиальный кабель. Выходы 10 и 11 делителя 8 соединены с концами 5 и 6 проводников возбуждателя отрезками линий передачи 12 и 13, которые имеют соответствующее конструктивно-технологическое исполнение, как то: отрезки коаксиального кабеля, печатные симметричные/несимметричные линии, копланарные волноводы и т. п.

Подбором длин упомянутых линий передачи 12 и 13 обеспечивается требуемая разность фаз α напряжений, питающих возбудитель. Под воздействием этих напряжений на проводящей поверхности цилиндрических проводников 2 и 3 (рис. 1) возникают высокочастотные электрические токи, которые распределяются вдоль проводников так, что возбуждаемое ими в окружающем пространстве электромагнитное поле удовлетворяет уравнениям Максвелла и граничным условиям на поверхности проводников. В соответствии с общей методикой анализа любых излучателей вначале решается внутренняя задача, позволяющая найти распределение сторонних токов по излучающим элементам (в частности по их поверхностям), а затем в процессе решения внешней задачи находятся необходимые эксплуатационные характеристики облучателя [1].

Внутренняя задача для данного возбудителя с центрально-концевым питанием уже решена в [2], где найдено, что выражение для «нитевидного» тока проводимости вдоль проводников 2 и 3 имеет вид

$$\vec{I}(x' = 0, y' = 0, z') = \begin{cases} \vec{z}_0 I_m e^{j\alpha} \sin[k(l - z')], & 0 < z' \leq l, \\ \vec{z}_0 I_m \sin[k(-z)], & -l \leq z' < 0, \end{cases} \quad (3)$$

где штрихи у координат (x', y', z') означают принадлежность текущей точки рассмотрения проводнику 2 и 3 только; I_m – амплитуда синусоиды; k – волновое число; l – длина проводника. Поэтому можно приступить к решению внешней задачи, в частности той ее части, которая связана с диаграммой направленности возбудителя. Для этого весь возбудитель в интервале $[-l, +l]$ (рис.1) разбивается на большое число коротких фрагментов длиной $\Delta z'$, каждый из которых мыслится как элементарный диполь Герца [1]. Затем число фрагментов устремляется к бесконечности ($\Delta z' \approx dz'$), что позволяет записать θ -компоненту напряженности электрического поля dE_θ в произвольной точке $P(x, y, z)$ [или $P(R, \theta, \varphi)$] дальней зоны Фраунгофера как [1]

$$dE_\theta = j\eta \frac{kI(z')e^{-jkR_s}}{4\pi R_s} \sin \theta_1 dz', \quad (4)$$

здесь $\vec{R}_s = \vec{R} - \vec{z}'$ есть разностный вектор между радиусом-вектором $\vec{R}(x, y, z)$ произвольной точки наблюдения $P(x, y, z)$ и текущим радиусом-вектором $\vec{z}' = \vec{z}_0 z'$ точки рассмотрения (будущего интегрирования) $Q(x', y', z')$, перемещающейся по оси z' проводников 2 и 3 от точки $z' = -l$ до точки $z' = +l$; θ_1 – угол между разностным вектором \vec{R}_s и осью z в положительном ее направлении; η – характеристическое сопротивление пространства, окружающего возбудитель.

Для точек дальней зоны Фраунгофера справедливы соотношения [1]:

$$\theta_1 = \theta; \quad R_s \approx R - z' \cos \theta; \quad 1/R_s \approx 1/R. \quad (5)$$

Поэтому итоговое выражение для напряженности электрического поля всего облучателя можно записать на основании принципа суперпозиции в виде

$$E_\theta = \int_{-l}^l dE_\theta = j\eta \frac{ke^{-jkR}}{4\pi R} \sin \theta \int_{-l}^l I(z') e^{jkz' \cos \theta} dz'. \quad (6)$$

Пусть вначале разность фаз α выходных напряжений делителя 8 равна нулю, что соответствует использованию синфазного питания возбуждителя, например, кольцевым делителем мощности $\lambda/2$. Тогда после подстановки в (6) распределения тока (3) при $\alpha = 0$ можно записать:

$$E_{\theta} = j\eta \frac{kI_m}{4\pi} \sin \theta \frac{e^{-jkR}}{R} \left[\int_{-l}^0 \sin[k(-z)] e^{jkz' \cos \theta} dz' + \int_0^l \sin[k(l-z')] e^{jkz' \cos \theta} dz' \right]. \quad (7)$$

Каждый из интегралов в (7) вычисляется с использованием неопределенного интеграла вида

$$\int e^{ax} \sin(bx + c) dx = \frac{e^{ax}}{a^2 + b^2} [a \sin(bx + c) - b \cos(bx + c)], \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} a &= jk \cos \theta, \quad -l \leq z' \leq +l, \\ c &= 0, \quad \text{если } -l \leq z' < 0, \\ c &= kl, \quad \text{если } 0 < z' \leq +l, \\ b &= -k, \quad -l \leq z' \leq +l. \end{aligned} \quad (9)$$

После преобразований (7) примет вид

$$E_{\theta} = j\eta \frac{I_m e^{-jkR}}{4\pi R} \left[\frac{Q}{\sin \theta} \right], \quad (10)$$

Здесь

$$\begin{aligned} Q &= \operatorname{Re}[Q] + jI_m[Q]; \\ \operatorname{Re}[Q] &= 1 - \cos(kl \cos \theta) \cos(kl) + \cos(kl \cos \theta) - \\ &\quad - \sin(kl \cos \theta) \cos \theta \sin(kl) - \cos(kl); \\ \operatorname{Im}[Q] &= \sin(kl \cos \theta) \cos(kl) + \sin(kl \cos \theta) - \\ &\quad - \cos(kl \cos \theta) \sin(kl) \cos \theta - \cos \theta \sin(kl). \end{aligned}$$

Используя (10) для построения диаграмм направленности, можно прийти к заключению, что при $\alpha = 0$ ее максимум ориентирован перпендикулярно оси z облучателя, а сама диаграмма удовлетворяет критерию всенаправленности в плоскости магнитного вектора, так как $H_{\varphi} = E_{\theta} / \eta$. Если же разность фаз α отличается от нуля, то плоскость всенаправленности наклоняется к оси z в ту или иную сторону в зависимости от знака α . Это открывает возможность изменять направление излучения директорной антенны за счет электрической коммутации p - i - n -диодами длин соединительных линий 12 и 13 (рис. 1), формируя таким образом *многолучевую директорную антенну*.

2. Комплексное входное сопротивление дипольных возбудителей центрально-концевым питанием

Расчет комплексного входного сопротивления ведется согласно методу наводимых электродвижущих сил [1, 10–11], в котором произведение продольной составляющей $E_z(z)$ электрического поля на боковой поверхности цилиндров диполя и комплексно-сопряженного распределения тока (3) интегрируется по длине обоих цилиндров от $z = -l$ до $z = +l$. При этом должно быть учтено, что для произвольной точки рассмотрения z' оси цилиндров справедливо соотношение [1]

$$\frac{d^2 I(z')}{dz'^2} + k^2 I(z') = 0. \quad (11)$$

Продольная составляющая $E_z(z)$ определяется составляющей запаздывающего векторного электродинамического потенциала $\vec{A}(x, y, z) = \vec{z}_0 A_z(z)$ [1]:

$$E_z(z) = \frac{1}{j\omega\epsilon_a} \left[k^2 A_z(z) + \frac{d^2 A_z(z)}{dz^2} \right], \quad (12)$$

где $\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon_r$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды вокруг диполя; ω – круговая частота источника сигнала, подключенного ко входу \mathcal{P} делителя мощности δ (рис. 1). В свою очередь сам потенциал $\vec{A}(x, y, z)$ рассчитывается как [1]

$$\begin{aligned} \vec{A}(x, y, z) = \vec{z}_0 A_z(z) = \vec{z}_0 \frac{I_m}{4\pi} \left\{ \int_{-l}^0 \sin[k(-z')] \frac{e^{-jkr}}{r} dz' + \right. \\ \left. + \int_0^l \sin[k(l-z')] \frac{e^{-jkr}}{r} dz' \right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь

$$r = \sqrt{a^2 + (z - z')^2}, \quad (14)$$

иными словами, переменная r зависит как от z , так и от z' , что следует учитывать далее при преобразованиях следующего выражения:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 A_z(z)}{dz^2} &= \frac{d^2}{dz^2} \left[\int_{-l}^l I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} dz' \right] = \int_{-l}^l \frac{d^2}{dz^2} \left[I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} \right] dz' = \\ &= \int_{-l}^l I(z') \frac{d^2}{dz^2} \left[\frac{e^{-jkr}}{r} \right] dz', \end{aligned} \quad (15)$$

а именно: производная от интеграла по z' (со штрихом) берется по переменной z (без штриха). Поэтому не имеет значения, когда дифференцировать по z (без штриха): до интегрирования по z' (со штрихом) или после интегрирования по z' (со штрихом). Затем все, что зависит от z' (со штрихом) только, выносится за производную, но не за интеграл. Кроме того, далее будет использована следующая взаимосвязь вторых производных выражения (14):

$$\frac{d^2}{dz'^2} \left[\frac{e^{-jkr}}{r} \right] = \frac{d^2}{dz'^2} \left[\frac{e^{-jkr}}{r} \right], \quad (16)$$

что приводит к результату:

$$\begin{aligned} E_z(z) &= \xi \left\{ k^2 \int_{-l}^l I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} dz' + \frac{d^2}{dz'^2} \left[\int_{-l}^l I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} dz' \right] \right\} = \\ &= \xi \left\{ k^2 \int_{-l}^l I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} dz' + \int_{-l}^l I(z') \frac{d^2}{dz'^2} \left[\frac{e^{-jkr}}{r} \right] dz' \right\} = \\ &= \xi \left\{ k^2 \int_{-l}^l I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} dz' + \text{Int} \right\}, \quad (17) \end{aligned}$$

где

$$\xi = \frac{1}{j4\pi\omega\epsilon_a}. \quad (18)$$

Входящий в выражение (17) интеграл Int представляем суммой двух интегралов J_1 по левой ветви диполя $[-l, 0]$ и J_2 по правой половине диполя $[0, +l]$:

$$\begin{aligned} \text{Int} &= J_1 + J_2 = \int_{-l}^0 I_m \sin[k(-z')] \frac{d^2}{dz'^2} \left[\frac{e^{-jkr}}{r} \right] dz' + \\ &+ \int_0^l I_m \sin[k(l-z')] \frac{d^2}{dz'^2} \left[\frac{e^{-jkr}}{r} \right] dz', \quad (19) \end{aligned}$$

а затем каждый из интегралов J_1 и J_2 дважды интегрируем по частям. В результате при $\alpha = 0$ (синфазный делитель мощности δ на рис.1) получаются следующие результаты:

$$J_1 = J_{11} - J_{12} + J_{13}, \quad (20)$$

$$J_{11} = -I_m \sin(kl) (1 + jkR_2) \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} \frac{(z+l)}{R_2^2}, \quad (21)$$

$$J_{12} = -I_m k \frac{e^{-jkR_0}}{R_0} + I_m k \cos(kl) \frac{e^{-jkR_2}}{R_2}, \quad (22)$$

$$J_{13} = \int_{-l}^0 \frac{d^2 I(z')}{dz'^2} \frac{e^{-jkr}}{r} dz', \quad (23)$$

$$J_2 = J_{21} - J_{22} + J_{23}, \quad (24)$$

$$J_{21} = -I_m \sin(kl) \frac{z}{R_0^2} (1 + jkR_0) \frac{e^{-jkR_0}}{R_0}, \quad (25)$$

$$J_{22} = kI_m \cos(kl) \frac{e^{-jkR_0}}{R_0} - kI_m \frac{e^{-jkR_1}}{R_1}, \quad (26)$$

$$J_{23} = \int_0^l \frac{d^2 I(z')}{dz'^2} \frac{e^{-jkr}}{r} dz', \quad (27)$$

$$R_1 = \sqrt{a^2 + (z-l)^2}; R_2 = \sqrt{a^2 + (z+l)^2}; R_0 = \sqrt{a^2 + z^2}. \quad (28)$$

Подставляя формулы (20)–(27) в выражение (17), последовательно получаем:

$$\begin{aligned} E_z(z) &= \xi \left\{ k^2 \int_{-l}^l I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} dz' + J_{11} - J_{12} + J_{13} + J_{21} - J_{22} + J_{23} \right\} = \\ &= \xi \left\{ \left[k^2 \int_{-l}^0 I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} dz' + \int_{-l}^0 \frac{d^2 I(z')}{dz'^2} \frac{e^{-jkr}}{r} dz' \right] + J_{11} - J_{12} + \right. \\ &\quad \left. + \left[k^2 \int_0^l I(z') \frac{e^{-jkr}}{r} dz' + \int_0^l \frac{d^2 I(z')}{dz'^2} \frac{e^{-jkr}}{r} dz' \right] + J_{21} - J_{22} \right\} = \\ &= \xi \{ J_{11} - J_{12} + J_{21} - J_{22} \}. \quad (29) \end{aligned}$$

Здесь учтено, что обе квадратные скобки в (29) тождественно равны нулю на основании свойства (11). Далее следует отметить, что

$$\frac{k}{\omega \varepsilon_a} = 120\pi. \quad (30)$$

Поэтому на заключительном шаге анализа получаем следующие выражения для комплексного входного сопротивления $Z_m = R_m + jX_m$, отнесенного к току I_m в максимуме синусоиды распределения (другими словами: к пучности I_m распределения (3) тока проводимости вдоль диполя с центрально-концевым питанием):

$$\begin{aligned} Z_m = R_m + jX_m &= -\frac{1}{I_m I_{m-l}^*} \int_{-l}^l E_z(z) I^*(z) dz = \\ &= -\frac{1}{I_{m-l}^2} \int_{-l}^0 -j30I_m [s_1 + s_2 + s_3 + s_4] I_m \sin(k|z|) dz + \\ &\quad + \left\{ -\frac{1}{I_m^2} \int_0^l -j30I_m [t_1 + t_2 + t_3 + t_4] I_m \sin[k(l-z)] dz \right\}, \quad (31) \end{aligned}$$

где

$$s_1 = -\sin(kl) (1 + jkR_2) \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} \frac{z+l}{(kR_2^2)}, \quad (32)$$

$$s_2 = \frac{e^{-jkR_0}}{R_0} - \cos(kl) \frac{e^{-jkR_2}}{R_2}, \quad (33)$$

$$s_3 = -\sin(kl)(1 + jkR_0) \frac{e^{-jkR_0}}{R_0} \frac{z}{(kR_0^2)}, \quad (34)$$

$$s_4 = \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} - \cos(kl) \frac{e^{-jkR_0}}{R_0}, \quad (35)$$

причем величины t_1, t_2, t_3 и t_4 определяются по тем же формулам, что и s_1, s_2, s_3, s_4 , только с учетом знака переменной z . По результатам вычислений построены графики R_m и X_m для различных значений радиуса a (рис. 2), которые использованы далее для формирования стартового облика облучателя с печатным делителем мощности δ для целей полноволнового моделирования и экспериментальных исследований.

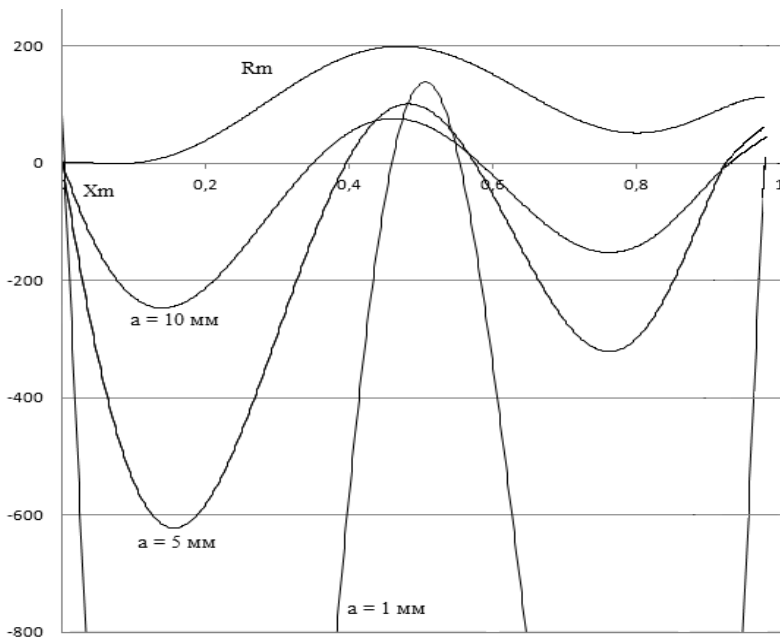


Рис. 2 – Зависимость вещественной R_m и мнимой X_m составляющих комплексного входного импеданса диполя с центрально-концевым питанием от его относительной длины

Fig. 2 – The real R_m and imaginary X_m parts of complex input impedance of center-end-fed dipole radiator as the functions of relative length

3. Полноволновое моделирование и результаты экспериментальных исследований

Для экспериментального подтверждения полученных результатов был изготовлен дипольный облучатель с центрально-концевым питанием на частоту $f_c = 2,1$ ГГц. Была поставлена задача сформировать отклоненную в плоскости

электрического вектора диаграмму направленности на 20° от оси вправо, т. е. угловое положение максимума диаграммы характеризуется углом сферической системы координат $\theta = 110^\circ$. Использование материалов раздела 1 показало, что разность фаз α возбуждения плеч диполя должна составить $\alpha = 86^\circ$. Поэтому для реализации облучателя был выбран микрополосковый кольцевой делитель мощности $\lambda_c/2$ с удлинением одного из выходов на величину, близкую к $\lambda_c / (4\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}}})$, где $\varepsilon_{\text{эфф}}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость отечественного диэлектрика ФЛАН-5 (арилокс, наполненный двуокисью титана [4], $\varepsilon_r = 5$) толщиной 2,0 мм. При этом волновое сопротивление питающего коаксиального кабеля составило 50 Ом, а расчет геометрических размеров топологии кольцевого делителя (рис. 3) выполнялся по материалам работы [13]. Оба цилиндрических плеча диполя были реализованы из отрезков медной трубки, образующей наружный проводник полужесткого коаксиального кабеля РК-50-2-25-А [14, 15], в результате чего исследуемый облучатель приобрел облик, представленный на рис. 4.

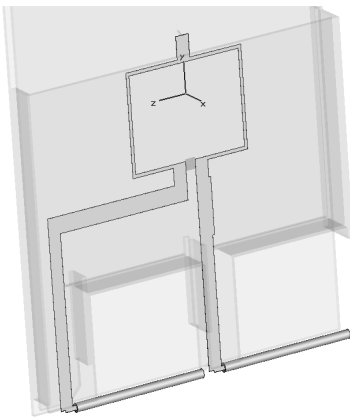
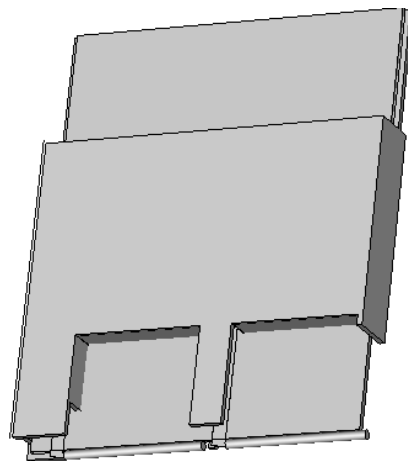


Рис. 3 – Взаимное расположение печатного кольцевого делителя и излучающих цилиндрических проводников диполя

Fig. 3 – The common view of printed ring power divider and radiating cylindrical wires of dipole

Рис. 4 – Внешний вид дипольного возбуждителя

Fig. 4 – The external view of the dipole driver



Согласование спроектированного излучателя характеризуется рис. 5 (сплошная линия – моделирование, точки – эксперимент), причем для полноволнового моделирования использовался программный продукт WIPL-D, свободно продающийся на рынке в виде компакт-диска, прилагающегося к работе [16]. Сечение пространственной диаграммы направленности в плоскости yoz электрического вектора представлено на рис. 6, что подтверждает факт отклонения максимума излучения на 20° вправо от оси y . На рис. 7 изображено сечение пространственной диаграммы направленности плоскостью, проходящей через ось x , перпендикулярную плоскости yoz под углом $\theta = 110^\circ$, свидетельствующее о хорошей степени симметрии диаграммы

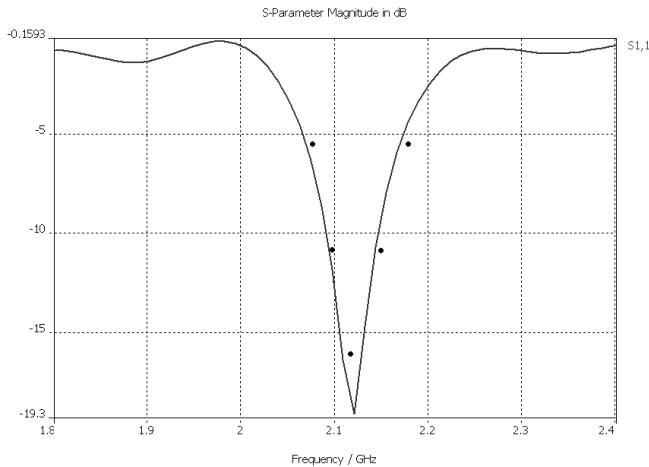


Рис. 5 – Частотная характеристика возвратных потерь возбуждителя с центрально-концевым питанием

Fig. 5 – The return loss of the driver with center-end-fed excitation versus frequency

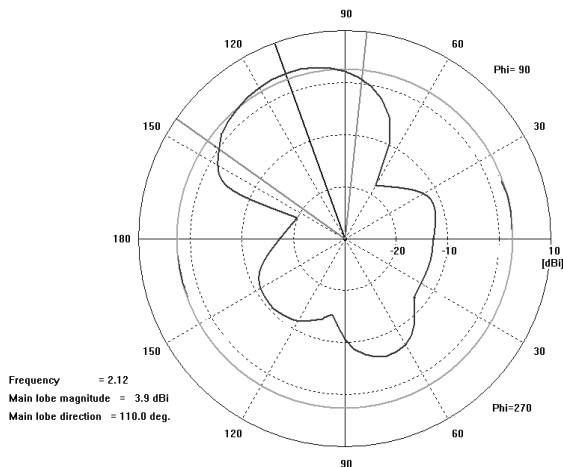


Рис. 6 – Диаграмма направленности возбуждителя в плоскости электрического вектора

Fig. 6 – The E-plane radiation pattern of the driver

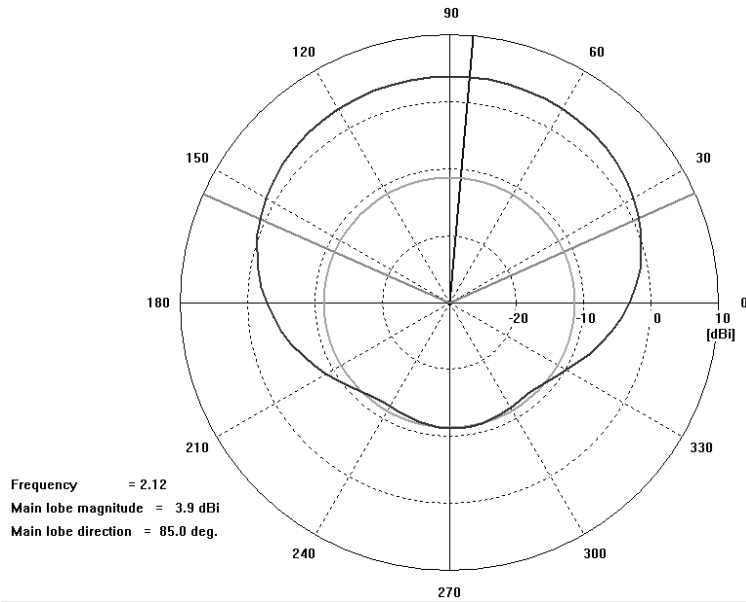


Рис. 7 – Диаграмма направленности возбуждателя в плоскости магнитного вектора

Fig. 7 – The H-plane radiation pattern of the driver

Заключение

Проведенные в работе теоретические и экспериментальные исследования нового дипольного излучателя с центрально-концевым питанием свидетельствуют о его пригодности для реализации облучателей директорных антенн с отклоненным от нормали максимумом излучения. Это создает предпосылки для построения хорошо согласованных с питающим коаксиальным кабелем многлучевых директорных антенн, формирующих веер диаграмм направленности (лучей) с одной конструктивно-технологической сборочной единицы, что соответствует современным тенденциям в проектировании компактных антенн [17].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Марков Г.Т., Сазонов Д.М.** Антенны. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.
2. Design of a multiband quasi-Yagi-Type antenna with CPW-to-CPS Transition / Y. Ding, Y.C. Jiao, P. Fei, B. Li, Q.T. Zhang // IEEE Antennas and Propagation Letters. – 2011. – Vol. 10. – P. 1120–1123.
3. A broadband planar quasi-Yagi antenna / N. Kaneda, W.R. Deal, Q. Yongxi, R. Waterhouse, T. Itoh // IEEE Transactions Antennas and Propagation. – 2002. – Vol. 50, N 8. – P. 1158–1160.
4. A multiband quasi-Yagi type antenna / S.-J. Wu, C.-H. Kang, K.-H. Chen, J.-H. Tarnq // IEEE Transactions Antennas and Propagation. – 2010. – Vol. 58, N 2. – P. 593–596.
5. **Sar J., Qian Y., Itoh T.** Coplanar waveguide fed quasi-Yagi antenna // Electronics Letters. – 2010. – Vol. 36, N 1. – P. 1/2.
6. **Alhalabi R.A., Rebeiz G.M.** Differentially-fed millimeter-wave Yagi-Uda antennas with folded dipole feed // IEEE Transactions Antennas and Propagation. – 2010. – Vol. 58, N 3. – P. 966–969.
7. **Лось В.Ф.** Микрополосковые диэлектрические резонаторные антенны / под ред. Л.Д. Бахраха. – М.: ИПРЖР, 2002. – 96 с.

8. **Чебышев В.В.** Микрополосковые антенны и решетки в слоистых средах. – М.: Радиотехника, 2003. – 104 с.
9. Заявка на выдачу патента № 2014110774. Вибраторная антенна / А.И. Борейчук, А.П. Горбачев, Н.А. Кириллова, А.В. Шведова. – Заявл. 24.03.2014.
10. **Горбачев А.П., Тарасенко Н.В.** Компактные и двухчастотные директорные антенны. – Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 146 с.
11. Устройства СВЧ и антенны / Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарев. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.
12. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.
13. **Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р.** Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. – М.: Советское радио, 1972. – 112 с.
14. **Гальперович Д.Я., Павлов А.А., Хренков Н.Н.** Радиочастотные кабели. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
15. **Вендик О.Г., Парнес М.Д.** Антенны с электрическим сканированием / под ред. Л.Д. Бахраха. – М.: Сайнс-Пресс, 2002. – 232 с.
16. **Kolundžija V.M., Ognjanovic J.S., Sarkar T.K.** WIPL-D microwave: circuit and 3D EM simulation for RF & microwave applications: software and user's manual. – Norwood: Artech House, 2005. – 388 p.
17. **Воскресенский Д.И., Овчинникова Е.В., Шмачилин П.А.** Бортовые цифровые антенные решетки и их элементы / под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2013. – 208 с.

INVESTIGATION OF THE DIPOLE DRIVERS FOR MULTI-BEAM YAGI-UDA ANTENNAS

Gorbachev A.P., Shvedova A.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The novel driver for Yagi-Uda antennas is analyzed. Such the driver is the dipole-like antenna with so-called center-end-fed excitation. The driver element is characterized by an angle of deflection of a directional pattern maximum from a perpendicular to an axis of both collinear conductors. The presented driver gives the possibility to create the good match between Yagi-Uda antenna and energized coaxial cable and to realize the devices with various deviation the E-plane radiation pattern from the antenna axis. The expressions for driver's complex input impedance are obtained by using the induced electromotive force method. As a result of calculations, dependency diagrams of real and imaginary part of a complex input impedance of a dipole with central-end feed, from its relative length which are used for formation of starting shape of an exciter with a printing power divider for full-wave modeling and experimental research are constructed. The results of numerical modeling of driver's parameters are very close to the experimental ones. The proposed center-end-fed dipole driver may be used to excite the Yagi-Uda antennas as well as the phased array radars, turnstile antennas and so on.

Keywords: dipole, radiation pattern, Yagi-Uda antenna, complex input impedance, electromagnetic field.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-34-47

REFERENCES

1. Markov G.T., Sazonov D.M. *Antenny* [Antennas]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 528 p.
2. Ding Y., Jiao Y.C., Fei P., Li B., Zhang Q.T. Design of a multiband quasi-Yagi-type antenna with CPW-to-CPS transition. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, vol. 10, pp. 1120–1123.

3. Kaneda N., Deal W.R., Yongxi Q., Waterhouse R., Itoh T. A broadband planar quasi-Yagi antenna. *IEEE Transactions Antennas and Propagation*, 2002, vol. 50, no. 8, pp. 1158–1160.
4. Wu S.-J., Kang C.-H., Chen K.-H., Tarng J.-H. A multiband quasi-Yagi type antenna. *IEEE Transactions Antennas and Propagation*, 2010, vol. 58, no. 2, pp. 593–596.
5. Sar J., Qian Y., Itoh T. Coplanar waveguide fed quasi-Yagi antenna. *Electronics Letters*, 2010, vol. 36, no. 1, pp. 1–2.
6. Alhalabi R.A., Rebeiz G.M. Differentially-fed millimeter-wave Yagi-Uda antennas with folded dipole feed. *IEEE Transactions Antennas and Propagation*, 2010, vol. 58, no. 3, pp. 966–969.
7. Los' V.F. *Mikropoloskovyye dielektricheskie rezonatornyye anteny* [The microstrip dielectric resonator antennas]. Ed. by L.D. Bahrah. Moscow, IPRZhR Publ., 2002. 96 p.
8. Chebyshev V.V. *Mikropoloskovyye anteny i reshetki v sloistykh sredakh* [The microstrip antennas and arrays in the layered mediums]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003. 104 p.
9. Boreichuk A.I., Gorbachev A.P., Kirillova N.A., Shvedova A.V. *Vibratornaya antenna* [Dipole antenna]. Patent invention, no. 2014110774, 2014.
10. Gorbachev A.P., Tarasenko N.V. *Kompaktnyye i dvukhchastotnyye direktornyye anteny* [Compact and dual-frequency Yagi-Uda antennas]. Saarbrücken, LAMBERT Academic Publishing, 2013. 146 p.
11. Voskresenskii D.I., Gostyukhin V.L., Maksimov V.M., Ponomarev L.I. *Ustroystva SVCh i anteny* [The microwave devices and antennas]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006. 376 p.
12. Vol'man V.I., ed. *Spravochnik po raschetu i konstruirovaniyu SVCh poloskovykh ustroystv* [Handbook for design and implementation of microwave strip-line devices]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 328 p.
13. Maloratskii L.G., Yavich L.R. *Proektirovanie i raschet SVCh elementov na poloskovykh liniyakh* [Design of microwave components on a base of strip lines]. Moscow, Sovetskoye Radio Publ., 1972. 112 p.
14. Gal'perovich D.Ya., Pavlov A.A., Khrenkov N.N. *Radiochastotnyye kabeli* [Radiofrequency cables]. Moscow, Energoatomisdat Publ., 1990. 256 p.
15. Vendik O.G., Parnes M.D. *Anteny s elektricheskim skanirovaniem* [The electrically scanned antennas]. Ed. by L.D. Bahrah. Moscow, Sains-Press Publ., 2002. 232 p.
16. Kolundžija B.M., Ognjanovic J.S., Sarkar T.K. *WIPL-D microwave: circuit and 3D EM simulation for RF & microwave applications: software and user's manual*. Norwood, Artech House, 2005. 388 p.
17. Voskresenskii D.I., Ovchinnikova E.V., Shmachilin P.A. *Bortovyye tsifrovyye anteny reshetki i ikh elementy* [The digital mobile antenna arrays and its elements]. Ed. by D.I. Voskresenskii. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2013. 208 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Горбачев Анатолий Петрович – родился в 1951 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов – фазированные антенные решетки. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корп. 4. E-mail: apgor@ngs.ru).

Gorbachev Anatoly Petrovich (b. 1951) – Doctor of Sciences (Eng), Professor, Professor at the Radio receiving and Radio transmitting Devices Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on analysis and development of microwave systems, phased radar and passive microwave components. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, E-mail: apgor@ngs.ru).



Шведова Анна Владимировна – родилась в 1987 году. Аспирантка кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Опубликовано 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корп. 4. E-mail: annsh21@mail.ru).

Shvedova Anna Vladimirovna (b. 1987) – PhD student of the Receiver and Radio Transmitter Devices Department in the Novosibirsk State Technical University. He is author of 10 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, E-mail: annsh21@mail.ru).

*Статья поступила 01июня 2015 г.
Received June 01, 2015*

To Reference:

Gorbachev A.P., Shvedova A.V. Issledovanie dipol'nykh vozbuditelei mnogoluchevykh direktornykh antenn [Investigation of the dipole drivers for multi-beam yagi-uda antennas]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 1 (30), pp. 34–47. doi: 10.17212/1727-2769-2016-1-34-47

УДК 621.3.049.779

**ВЛИЯНИЕ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ
НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ МЭМС****В.П. Драгунов, В.Ю. Доржиев***Новосибирский государственный технический университет*

При разработке и создании электростатических МЭМС возникает необходимость в определении электрической емкости и электростатических сил, действующих между различными частями конструкции. Эти параметры могут быть рассчитаны с использованием различных подходов. Наиболее распространенным является подход, в рамках которого не учитываются краевые эффекты, однако он приводит к большим погрешностям в случае, когда межэлектродные расстояния соизмеримы с линейными размерами самих электродов. Использование САПР, основанных на методах конечных или граничных элементов, позволяет получить более точные оценки, однако требует большого количества времени и мощной вычислительной техники, а также затрудняет дальнейшие процессы оптимизации и проектирования. На начальных этапах проектирования МЭМС требуются быстрые и наглядные методы расчета электростатических взаимодействий. Поэтому большой интерес представляет поиск аналитических выражений, позволяющих вычислять емкости и силы с достаточной для практических применений точностью. В данной работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований электростатических взаимодействий в МЭМС с плоскопараллельными электродами. В 2D-приближении рассчитаны зависимости емкости и электростатической силы от величины межэлектродного зазора с учетом их конечных размеров и перераспределения зарядов. Проводится сравнение экспериментальных и теоретических результатов. Приводятся аппроксимационные формулы для расчета емкости и силы с учетом краевых эффектов. Оценены пределы применимости формул, учитывающих краевые эффекты в 2D-приближении.

Ключевые слова: МЭМС, электрическая емкость, краевые эффекты, метод площадок, метод граничных элементов, аппроксимационные формулы.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-48-61

Введение

Современный период развития полупроводниковой электроники неразрывно связан с микроэлектромеханическими системами (МЭМС). Основные области их применения: автомобильная промышленность; аэрокосмическая, вычислительная, медицинская и бытовая техника; средства обеспечения безопасности; индустриальные системы и телекоммуникации.

При разработке электростатических МЭМС возникает необходимость в определении электрической емкости и электростатических сил, действующих между различными частями конструкции.

Эти параметры могут быть рассчитаны с использованием различных подходов. Наиболее распространенным является подход, в рамках которого не учитываются краевые эффекты. На основе такого подхода получена, например, формула для оценки емкости идеального плоского конденсатора (ИПК), которая, однако, приводит к большим погрешностям в случае, когда межэлектродные расстояния соизмеримы с линейными размерами самих электродов. Для некоторых простейших случаев в литературе встречаются аналитические выражения для расчета емкостей и электростатических сил с учетом краевых эффектов [1–7]. Однако эти выражения имеют достаточно ограниченный (часто неопределенный) интервал при-

менимости. Использование САПР, основанных на методах конечных (МКЭ) или граничных элементов (МГЭ) (ANSYS, CoventorWare, ELCUT, FastCap и др.), позволяет получить более точные оценки, однако требует большого количества времени и мощной вычислительной техники, а также затрудняет дальнейшие процессы оптимизации и проектирования МЭМС с одновременным учетом электрических и механических взаимодействий. Расчет же с использованием табличных данных [8] не обладает достаточной гибкостью, которая необходима на начальных этапах проектирования, кроме того, как правило, интервал применимости этих данных существенно ограничен.

На начальных этапах проектирования МЭМС требуются быстрые и наглядные методы расчета электростатических взаимодействий. Поэтому большой интерес представляет поиск аналитических выражений, позволяющих вычислять емкости и силы с достаточной для практических применений точностью. По мере уточнения моделей, используемых для анализа МЭМС, уточняются и модели, используемые для учета электростатических взаимодействий [3–7, 9–13].

В данной работе проводится экспериментальное и теоретическое исследование влияния краевых эффектов, связанных с конечными размерами электродов, на функционирование МЭМС с плоскопараллельной двухэлектродной структурой.

1. Методика эксперимента

На рис. 1 приведено схематическое изображение двухэлектродного плоскопараллельного конденсатора, используемого в работе для моделирования и измерения зависимости емкости системы от величины межэлектродного зазора.

В качестве объекта исследования использовалась модель МЭМС, представляющая собой два плоских параллельных проводящих электрода, в расчетах принималось, что электроды имеют длину a и ширину b , а межэлектродный зазор равен d (рис. 1). Межэлектродный зазор был заполнен воздухом. В эксперименте электроды закреплялись на диэлектрических подложках, которые в свою очередь монтировались на штативах измерительного прибора ИЗА-2, что позволяло устанавливать межэлектродный зазор с точностью 0,5 мкм.

Для измерения емкости использовался цифровой RLC измеритель E7-22, позволяющий измерять емкости от 0,1 пФ до 20 мФ с погрешностью $\pm 0,7\%$. Паразитная емкость составляла от 1,5 до 4,2 пФ и в дальнейшем вычиталась из экспериментальных зависимостей.

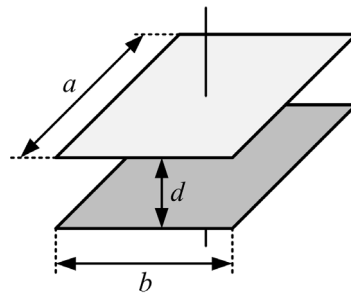


Рис. 1 – Модель МЭМС

Fig. 1 – MEMS model

2. Методика расчета

Для расчета зависимостей емкости от величины межэлектродного зазора использовались два метода: метод площадок (МП) [8, 11–13] и метод граничных элементов (МГЭ). При этом в рамках МП решалась система интегральных уравнений, связывающих потенциалы и плотность распределения зарядов по электродам. Численное решение такой задачи сводилось к отысканию вектора Q линейных зарядов, сосредоточенных в узлах дискретной сетки, при заданных значениях потенциалов электродов [11–12]. Компоненты же вектора Q находились из решения системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=0}^{2n-1} G_{i,j} Q_j &= \varphi_i \\ \sum_{j=0}^{2n-1} Q_j &= 0 \end{aligned} \right\}, i = 0, 1, \dots, 2n-1, \quad (1)$$

где φ_i – вектор узловых потенциалов, определяемый известными потенциалами электродов, n – число узлов дискретной сетки каждого электрода, $G_{i,j}$ – коэффициенты влияния.

Решив систему (1) относительно Q_j (полагая, что потенциал неподвижного электрода $\varphi_2 = 0$, а потенциал подвижного – $\varphi_1 = 1$), искомую емкость между электродами находили из соотношения

$$C = \sum_{j=0}^{n-1} Q_j.$$

Для расчета зависимости емкости от величины межэлектродного зазора с достаточной для практических применений точностью проводились специальные исследования. Точность расчетов по МП в первую очередь зависит от числа разбиений n , которая возрастает с его увеличением. На рис. 2 приведена зависимость нормированной емкости C^* от n при различных соотношениях геометрических размеров электродов конденсатора: 1 – $a:b:d = 2:1:2$, 2 – $a:b:d = 1:1:1$, 3 – $a:b:d = 2:1:1$, 4 – $a:b:d = 200:100:1$. Значения емкости нормировались на емкость, рассчитываемую по формуле идеального плоского конденсатора (ИПК)

$$C_1 = \varepsilon_0 \varepsilon ab/d, \quad (2)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды между электродами, ε_0 – электрическая постоянная.

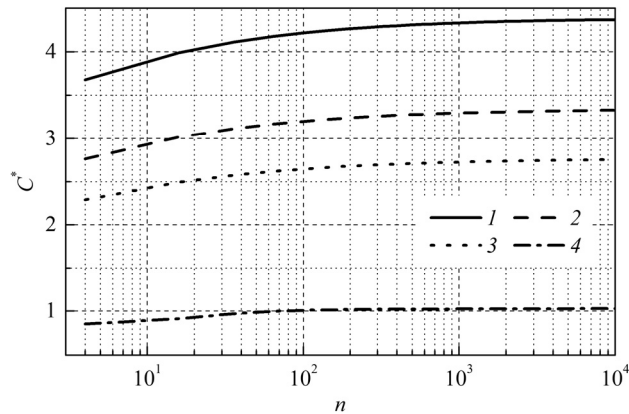


Рис. 2 – Зависимость нормированной емкости от числа разбиений при различных соотношениях геометрических размеров конденсатора

Fig. 2 – Dependence of normalized capacitance on number of partitions at different ratios of geometrical dimensions of the capacitor

Как видно из рис. 2, при $n > 1000$ зависимости выходят на насыщение, и емкость практически перестает меняться. Согласно расчетам, в самом худшем случае для достижения погрешности расчетов не более 1 % достаточно 1000 площадок. Поэтому далее расчеты проводились при $n = 1600$.

Для верификации результатов, полученных в рамках МП, применялся МГЭ (программный пакет FastCap), где использовались четырехузловые прямоугольные элементы, число разбиений по длине электрода составляло 100, по ширине – 60, а по толщине – 5.

3. Результаты расчетов и эксперимента

На рис. 3 представлены зависимости емкости от отношения величины межэлектродного зазора d к ширине электрода b при $a/b = 3.7$. Белыми маркерами обозначены экспериментальные результаты, сплошной серой линией – расчеты в рамках МП, черной пунктирной линией – расчеты в рамках МГЭ, черными маркерами – расчеты в рамках МКЭ (литературные данные, ANSYS [5]), сплошной черной линией – расчеты по формуле ИПК.

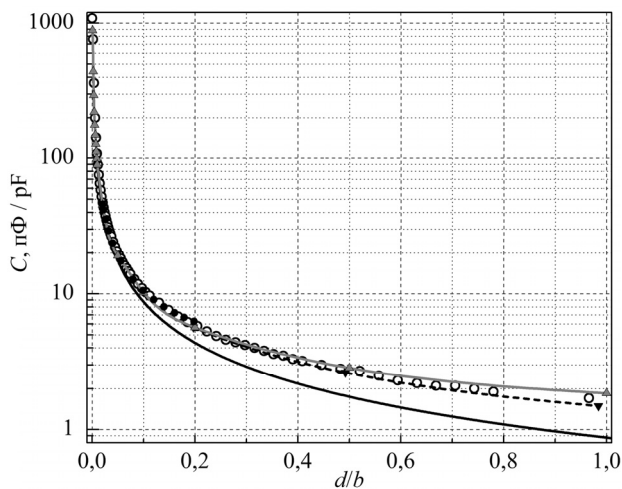


Рис. 3 – Зависимости емкости от нормированной величины межэлектродного зазора

Fig. 3 – Dependences of capacitance on normalized value of inter-electrode gap

Из рис. 3 видно, что зависимость емкости, рассчитанная с использованием формулы ИПК (сплошная черная линия), с увеличением межэлектродного зазора все больше расходится с экспериментом, что связано с проявлением краевых эффектов, не учитываемых моделью ИПК. Оценки показывают, что лишь для $d/b < 0,02$ и $d/b < 0,05$ значения емкостей могут быть найдены по формуле ИПК с погрешностью менее 5 и 10 % соответственно. С ростом отношения d/b погрешность расчетов с использованием формулы ИПК неуклонно растет, и при $d/b = 1$ различие с экспериментом составляет уже около 90 %, т. е. в данном случае для вычисления емкости формулу ИПК использовать нельзя.

На рис. 4 представлены зависимости емкости от отношения ширины электрода b к величине межэлектродного зазора d для двухэлектродной системы

с $a/b=1$. Белыми маркерами обозначены экспериментальные результаты, сплошной линией – расчеты в рамках МП, черными маркерами – табличные данные из [8]. Согласно рис. 4 зависимость, рассчитанная в рамках МП, в диапазоне $0,4 \leq b/d \leq 100$ расходитсся с экспериментом не более чем на 12 %, что может быть связано с вкладом паразитной емкости при проведении эксперимента и вполне приемлемо для практических применений.

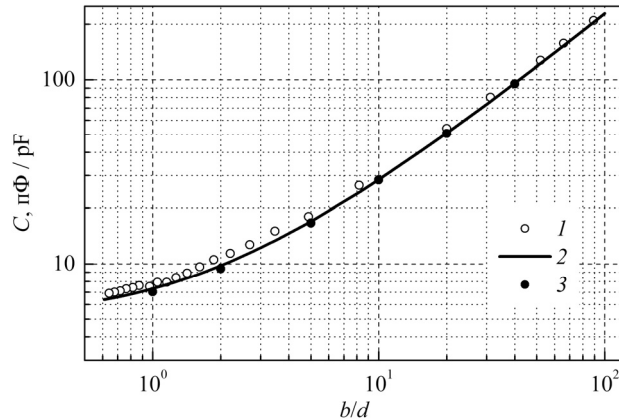


Рис. 4 – Зависимости емкости от нормированной величины межэлектродного зазора:

1 – эксперимент; 2 – расчеты в рамках МП; 3 – данные из [8]

Fig. 4 – Dependences of capacitance on normalized value of inter-electrode gap:

1 – experiment; 2 – calculations by area method; 3 – data from [8]

Согласно рис. 3 и 4 зависимости, рассчитанные в рамках МП и МГЭ, в диапазоне $0 < d/b < 1$ расходятся с экспериментом не более чем на 11 и 13 % соответственно, что вполне приемлемо для практических применений. Результаты расчетов в рамках МП сравнивались также с табличными данными из [8], при этом расхождение составляло не более 5 %. Таким образом, оба метода расчета МП и МГЭ оказались близкими по точности, однако расчеты МГЭ в программном пакете FastCap затрудняют дальнейшие процессы оптимизации и проектирования МЭМС с учетом взаимосвязи электрических и механических составляющих сил. В связи с этим использование МП на этапе предварительного проектирования представляется более удобным. Поскольку расчеты емкости с использованием МП обладают достаточной точностью, то дальнейший анализ проводился на его основе.

4. Результаты расчетов и эксперимента

Как отмечалось выше, при проектировании МЭМС наиболее удобным является использование аналитических выражений. При этом, несмотря на то что, как показано выше, при $d/b > 0,05$ оценки, полученные с использованием модели ИПК, будут иметь погрешность более 10 %, для расчета зависимости емкости и электростатических взаимодействий от величины межэлектродного зазора в настоящее время наибольшее распространение получила модель ИПК.

На рис. 5 представлены зависимости нормированной емкости от отношения b/d при нескольких значениях отношения a/b . Кривые 1–3 рассчитаны в рамках МП, кривая 4 – расчет по формуле (2). Видно, что отклонение зависимости

рассчитанной по формуле ИПК, т. е. без учета краевых эффектов, от кривых, рассчитанных в рамках МП, заметно практически во всем диапазоне b/d , причем величина отклонения зависит от соотношения геометрических размеров электродов a/b .

Анализ погрешности в оценке емкости по формуле ИПК при различных соотношениях размеров сторон электродов показывает, что наибольшая погрешность наблюдается при $a/b = 1$, т. е. в случае, когда электроды имеют квадратную форму, это объясняется наиболее сильным проявлением краевых эффектов. Для данного случая при $b/d < 4$ отличие от вычислений в рамках МП превышает 40 %, что неприемлемо даже для оценочных расчетов. При $b/d > 12$ отличие составит уже менее 20 %, что для оценочных расчетов может быть уже приемлемым.

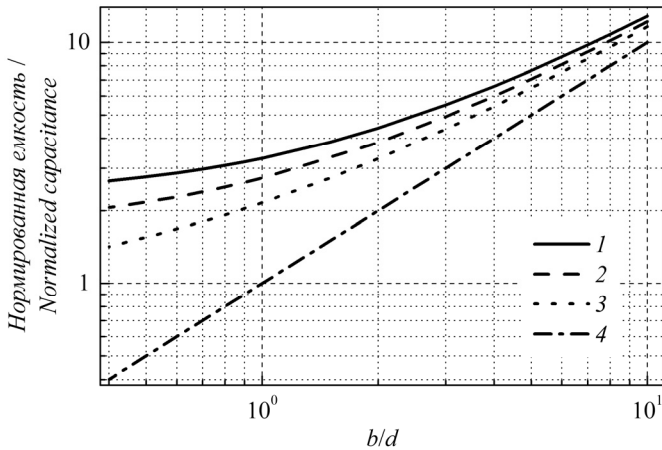


Рис. 5 – Зависимости нормированной емкости от отношения b/d :
 1 – расчет по МП при $a/b = 1$; 2 – расчет по МП при $a/b = 2$;
 3 – расчет по МП при $a/b = 20$; 4 – расчет по формуле ИПК

Fig. 5 – Dependences of normalized capacitance on b/d ratio:
 1 – calculations by area method at $a/b = 1$; 2 – calculations by area method
 at $a/b = 2$; 3 – calculations by area method at $a/b = 20$; 4 – calculation
 using simple formula

В литературе приводятся аналитические выражения для вычисления емкости с учетом краевых эффектов в двух направлениях (по длине и ширине – 2D-приближение). Используя метод конформных преобразований, Х.Б. Пальмер [1] представил приближенную формулу для оценки емкости плоскопараллельного конденсатора в виде

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a b}{d} \left[1 + \frac{d}{\pi b} + \frac{d}{\pi b} \ln \left(\frac{2\pi b}{d} \right) \right] \left[1 + \frac{d}{\pi a} + \frac{d}{\pi a} \ln \left(\frac{2\pi a}{d} \right) \right]. \quad (3)$$

Для оценки погрешности расчетов с использованием формулы Пальмера на рис. 6 представлены зависимости нормированной емкости $C_2/(\varepsilon_0 \varepsilon a)$ от отношения b/d , рассчитанные по формуле (3) (кривая 2) и в рамках МП (кривая 1).

Видно, что значения емкости, рассчитанные по формуле Пальмера, имеют некоторое расхождение со значениями, полученными в рамках МП. Оценки погрешности расчетов по формуле (3) показывают, что емкости, рассчитанные с

использованием (3) в интервале $0,4 \leq b/d \leq 10$, могут отличаться от рассчитанных в рамках МП на 11 %. При $b/d > 10$ отличие становится менее 6 %.

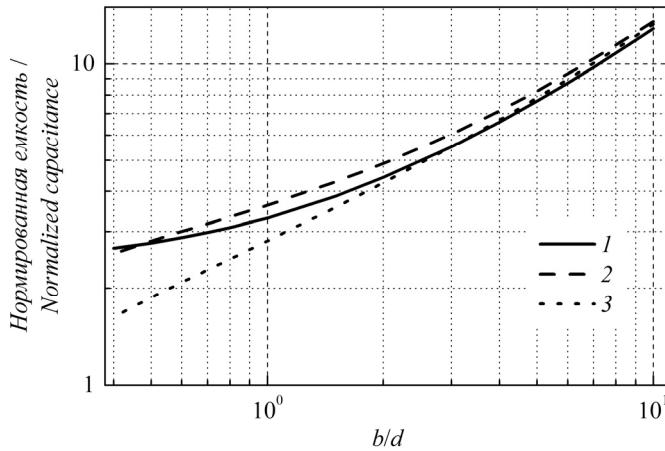


Рис. 6 – Зависимости нормированной емкости от отношения b/d при $a/b=1$:

1 – расчет по МП; 2 – расчет по формуле (3); 3 – расчет по формуле (4)

Fig. 6 – Dependences of normalized capacitance on b/d ratio at $a/b=1$:

1 – calculations by area method; 2 – calculation using (3); 3 – calculation using (4)

В [7] приведена еще одна формула для оценки емкости в 2D-приближении, которая имеет вид

$$C_3 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a b}{d} \left[1 + \frac{d}{\pi b} + \frac{d}{\pi b} \ln \left(\frac{2\pi b}{d} \right) + \frac{d}{\pi a} + \frac{d}{\pi a} \ln \left(\frac{2\pi a}{d} \right) \right]. \quad (4)$$

Для оценки погрешности сравним зависимость нормированной емкости $C_3/(\varepsilon_0 \varepsilon a)$ от отношения b/d , рассчитанную по формуле (4), с аналогичными расчетами в рамках МП (рис. 6, кривая 3). Видно, что при малых значениях b/d расчеты по формуле (4) и расчеты в рамках метода площадок начинают сильно различаться. Величина отклонения значений емкости, рассчитанных по формуле (4) от значений, полученных в рамках МП, при $b/d < 0,8$ превышает 20 %, тем не менее при $b/d > 2$ отличие становится менее 4 %.

На основании проведенного анализа нами была получена аппроксимационная формула для оценки емкости в 2D-приближении

$$C_4 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a b}{d} \left[1 + \frac{d}{\pi b} + \frac{d}{\pi b} \ln \left(2\pi \left(\frac{b}{d} + \frac{3}{4} \frac{b+a}{a} \right) \right) + \frac{d}{\pi a} + \frac{d}{\pi a} \ln \left(2\pi \left(\frac{a}{d} + \frac{3}{4} \frac{a+b}{b} \right) \right) \right]. \quad (5)$$

На рис. 7 приведена зависимость погрешности расчетов δ величины емкости по формуле (5) от b/d для различных соотношений a/b . Из рисунка видно, что

максимальная погрешность расчетов емкости с использованием (5) наблюдается при $a/b=1$, при этом в диапазоне $0,4 \leq b/d \leq 10$ погрешность не превышает 5 %, а при $b/d > 10$ она продолжает уменьшаться. В случае, же когда $a \gg b$ при $b/d \geq 0,4$, погрешность составляет менее 2 %.

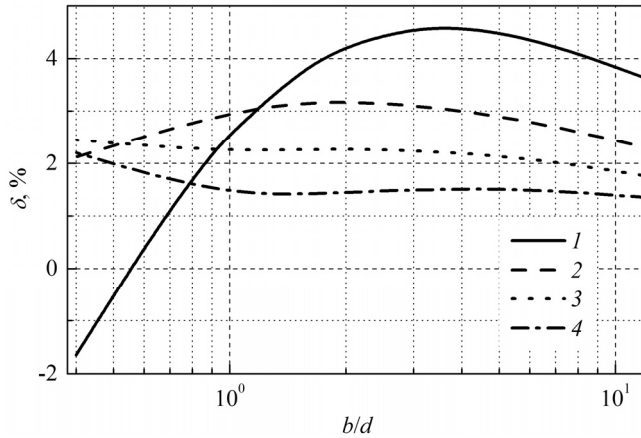


Рис. 7 – Зависимость погрешности δ расчетов с использованием формулы (5) от отношения b/d

Fig. 7 – Dependence of the error δ of calculations using (5) on b/d ratio

Для предварительных расчетов можно предложить еще три формулы разной сложности, аппроксимирующие (5) в диапазоне $b/d \geq 1$. Первая:

$$C_5 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon ab}{d} \left[1 + \theta_5 \frac{d(a+b)}{ba} \right] \quad (6)$$

при $\theta_5 = 1,24$ с погрешностью менее 7 %, вторая и третья:

$$C_6 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon ab}{d} \left\{ 1 + \frac{d}{\pi b} \left[1 + \theta_6 \ln \left(2\pi \left(\frac{b}{d} + \frac{3}{4} \right) \right) \right] + \frac{d}{\pi a} \left[1 + \theta_6 \ln \left(2\pi \left(\frac{a}{d} + \frac{3}{4} \right) \right) \right] \right\}, \quad (7)$$

$$C_7 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon ab}{d} \left\{ 1 + \frac{\theta_7 d}{\pi b} \ln \left[2\pi \left(\frac{b}{d} + 2 \right) \right] + \frac{\theta_7 d}{\pi a} \ln \left[2\pi \left(\frac{a}{d} + 2 \right) \right] \right\} \quad (8)$$

при $\theta_6 = 1,082$ и $\theta_7 = 1,225$ соответственно, с погрешностью менее 3%. Отметим, что для $b/d \geq 10$ (6) аппроксимирует зависимость емкости от геометрических размеров электродов с погрешностью менее 1,5 % при $\theta_5 = 1,77$, а (7) и (8) будут аппроксимировать (5) с погрешностью менее 1,5 % даже для $b/d \geq 2$, соответственно при $\theta_6 = 1,05$ и $\theta_7 = 1,24$.

Учет краевых эффектов сказывается не только на оценках величины емкости, но и на оценках электростатической силы. На рис. 8 приведены зависимости нор-

мальной компоненты электростатической силы от отношения d/b , рассчитанные при постоянном заряде Q на обкладках конденсатора и $a/b=1$. Значения силы F_y нормировались на соответствующие значения силы F_0 в точке $d/b=10^{-3}$. Черная сплошная линия – расчет с использованием формулы

$$F_y = Q^2 / (2\epsilon_0 \epsilon a b),$$

полученной в рамках модели ИПК; серая сплошная линия – расчет в рамках МП; черная пунктирная линия – расчет с использованием формулы

$$F_y = \frac{\frac{Q^2}{2\epsilon_0 \epsilon a b} \left[1 + \frac{1}{\pi \left(\frac{b}{d} + \frac{3}{4} \frac{b+a}{a} \right)} + \frac{1}{\pi \left(\frac{a}{d} + \frac{3}{4} \frac{b+a}{b} \right)} \right]}{\left[1 + \frac{d}{\pi b} \left(1 + \ln \left(2\pi \left(\frac{b}{d} + \frac{b+a}{4a/3} \right) \right) \right) \right] + \frac{d}{\pi a} \left(1 + \ln \left(2\pi \left(\frac{a}{d} + \frac{b+a}{4b/3} \right) \right) \right) \right]^2}, \quad (9)$$

полученной с учетом выражения (5).

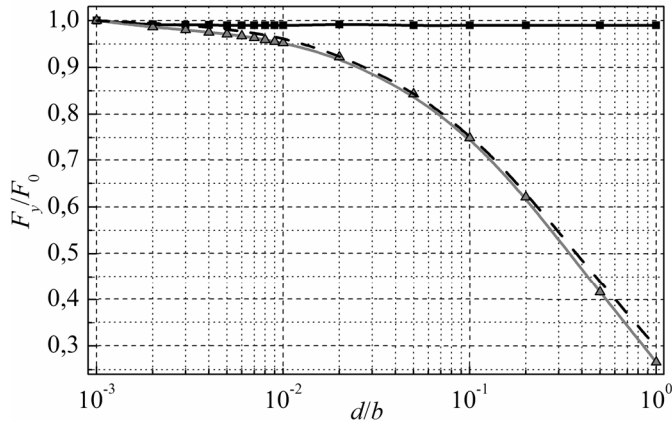


Рис. 8 – Зависимости электростатической силы от величины межэлектродного зазора при постоянном заряде на обкладках конденсатора

Fig. 8 – Dependences of electrostatic force on inter-electrode gap value at constant charge on the capacitor plates

Видно, что значения электростатической силы, рассчитанные с использованием выражения, полученного в рамках модели ИПК, существенно отличаются от значений, рассчитанных с использованием МП и выражения (9). Если для идеального конденсатора значения нормированной силы F_y/F_0 остаются постоянными во всем интервале d/b , то значения, рассчитанные с помощью МП и формулы (9), с ростом d/b резко уменьшаются. В результате значения нормированной силы в точке $d/b=1$, рассчитанные в приближении ИПК, отличаются от численно рассчитанных значений более чем на 270 %. В то время как значения, полученные с использованием найденного аппроксимационного выражения (9), отличаются в точке $d/b=1$ от оценок, полученных с использованием МП, не более чем на 12 %. Отметим, что значения силы, рассчитанные в приближении ИПК, отли-

чаются от численно рассчитанных значений не более чем на 10% при $d/b \leq 0,023$ и $a/b \geq 20$.

Используя аппроксимации (6–8), можно получить соответствующие приближенные выражения для вычисления силы F_y при постоянном заряде. При этом получим

$$F5_y = \frac{Q^2}{2\varepsilon_0\varepsilon ab} \frac{1}{\left(1 + \vartheta_5 d \frac{a+b}{ab}\right)^2}, \quad (10)$$

$$F6_y = \frac{\frac{Q^2}{2\varepsilon_0\varepsilon ab} \left[1 + \frac{\vartheta_6}{\pi \left(\frac{b}{d} + \frac{3}{4}\right)} + \frac{\vartheta_6}{\pi \left(\frac{a}{d} + \frac{3}{4}\right)}\right]}{\left[1 + \frac{d}{\pi b} \left(1 + \vartheta_6 \ln \left(2\pi \left(\frac{b}{d} + \frac{3}{4}\right)\right) + \frac{b}{a} + \vartheta_6 \frac{b}{a} \ln \left(2\pi \left(\frac{a}{d} + \frac{3}{4}\right)\right)\right)\right]^2}, \quad (11)$$

$$F7_y = \frac{\frac{Q^2}{2\varepsilon_0\varepsilon ab} \left[1 + \frac{\vartheta_7}{\pi \left(\frac{b}{d} + 2\right)} + \frac{\vartheta_7}{\pi \left(\frac{a}{d} + 2\right)}\right]}{\left[1 + \vartheta_7 \frac{d}{\pi b} \ln \left(2\pi \left(\frac{b}{d} + 2\right)\right) + \vartheta_7 \frac{d}{\pi a} \ln \left(2\pi \left(\frac{a}{d} + 2\right)\right)\right]^2}. \quad (12)$$

Анализ показывает, что выражение (10) аппроксимирует зависимость нормальной компоненты электростатической силы F_y от отношения b/d для $b/d \geq 1$ с погрешностью менее 15% при $\vartheta_5 = 1,085$, а для $b/d \geq 10$ с погрешностью менее 3% при $\vartheta_5 = 1,6$.

Выражение (11) аппроксимирует зависимость нормальной компоненты электростатической силы от отношения b/d для $b/d \geq 1$ с погрешностью менее 10% при $\vartheta_6 = 1,19$ и с погрешностью менее 5% для $b/d \geq 2$ при $\vartheta_6 = 1,1$.

В свою очередь выражение (12) аппроксимирует зависимость нормальной компоненты электростатической силы F_y от отношения b/d для $b/d \geq 1$ с погрешностью менее 8,5% при $\vartheta_7 = 1,21$ и с погрешностью менее 5% для $b/d \geq 2$ при $\vartheta_7 = 1,23$.

В случае, когда при изменении межэлектродного зазора сохраняется напряжение между обкладками конденсатора, выражение для расчета нормальной компоненты электростатической силы в приближении ИПК принимает вид

$$Fv_y = \varepsilon_0\varepsilon ab V^2 / (2d^2). \quad (13)$$

Для учета краевых эффектов, возникающих из-за конечных размеров электродов, вместо (13) для $a/b \gg 1$ в [9] предлагается использовать выражение

$$Fv_y = \frac{\varepsilon_0\varepsilon ab V^2}{2d^2} \left(1 + 0,65 \frac{d}{b}\right). \quad (14)$$

Адаптируя это выражение к 2D-случаю вместо (14) можно предложить выражение

$$Fv_{1y} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon ab V^2}{2d^2} \left(1 + v_1 \frac{d}{b} \left(1 + \frac{b}{a} \right) \right). \quad (15)$$

Сопоставляя результаты расчетов по формуле (15) с результатами моделирования с использованием выражения

$$Fv_{0y} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon ab V^2}{2d^2} \left(1 + \frac{1}{\pi \left(\frac{b}{d} + 0,75 \left(\frac{b}{a} + 1 \right) \right)} + \frac{1}{\pi \left(\frac{a}{d} + 0,75 \left(\frac{a}{b} + 1 \right) \right)} \right), \quad (16)$$

полученного нами на основании (5), можно показать, что выражение (15) аппроксимирует зависимость нормальной компоненты электростатической силы Fv_y от отношения b/d для $b/d \geq 1$ с погрешностью менее 3,8 % при $v_1 = 0,15$, а для $b/d \geq 2$ уже с погрешностью менее 1,7 % при $v_1 = 0,202$.

Сопоставляя же результаты расчетов по формуле (13) (приближение ИПК) с результатами моделирования с использованием выражения (16), можно показать, что выражение (13) аппроксимирует зависимость нормальной компоненты электростатической силы Fv_y от отношения b/d с погрешностью менее 20 % для $b/d \geq 1$ и с погрешностью менее 5,5 % для $b/d \geq 10$.

В ряде случаев расчеты нормальной компоненты электростатической силы при постоянном напряжении между электродами удобнее проводить с использованием выражения

$$Fv_{2y} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon ab V^2}{2d^2} \left(1 + \frac{v_2}{\pi \left(\frac{b}{d} + 0,75 \right)} + \frac{v_2}{\pi \left(\frac{a}{d} + 0,75 \right)} \right). \quad (17)$$

Сопоставляя результаты расчетов по формуле (17) с результатами моделирования с использованием выражения (16), можно показать, что выражение (17) аппроксимирует зависимость нормальной компоненты электростатической силы Fv_y от отношения b/d для $b/d \geq 1$ с погрешностью менее 3 % при $v_2 = 0,8$, а для $b/d \geq 2$ с погрешностью менее 1,5 % при $v_2 = 0,86$.

Заключение

В работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований электрической емкости и электростатической силы в МЭМС с плоскопараллельными электродами в 2D-приближении.

Приведены зависимости емкости от величины межэлектродного зазора, полученные экспериментально.

Рассчитаны зависимости емкости и силы от величины межэлектродного зазора с учетом их конечных размеров и перераспределения зарядов.

Показано, что при межэлектродных зазорах, соизмеримых с линейными размерами электродов, расчеты емкости и электростатической силы без учета краевых эффектов приводят к большим погрешностям и фактически могут использоваться лишь при $b/d \geq 10$.

Найдены аппроксимационные формулы для расчета емкости и силы с учетом краевых эффектов. Проведено сравнение экспериментальных и теоретических результатов и показано их хорошее совпадение.

Оценены пределы применимости формул, учитывающих краевые эффекты в 2D-приближении.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Palmer H.B.** Capacitance of a parallel-plate capacitor by the Schwartz-Christoffel transformation // *Electrical Engineering*. – 1937. – Vol. 56, iss. 3. – P. 363–368. – doi: 10.1109/EE.1937.6540485.
2. **Elliot R.S.** *Electromagnetics: history, theory, and applications*. – New York: McGraw-Hill, 1966. – 631 p.
3. **Osterberg P.M., Senturia S.D.** M-TEST: a test chip for MEMS material property measurement using electrostatically actuated test structures // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 1997. – Vol. 6, iss. 2. – P. 107–118. – doi: 10.1109/84.585788.
4. Mechanical design and optimization of capacitive micromachined switch / J.-M. Huang, K.M. Liew, C.H. Wong, S. Rajendran, M.J. Tan, A.Q. Liu // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2001. – Vol. 93, iss. 3. – P. 273–285. – doi: 10.1016/S0924-4247(01)00662-8.
5. **Leus V., Elata D.** Fringing field effect in electrostatic actuators // *Technical Report ETR*. – 2004. – Vol. 2. – P. 2–15.
6. **Драгунов В.П., Колчужин В.А., Остертак Д.И.** Влияние краевых эффектов на электрическую емкость в МЭМС // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2009. – № 2 (13). – С. 97–105.
7. **Nemirovsky Y., Vochobza-Degani O.** A methodology and model for the pull-in parameters of electrostatic actuators // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 2001. – Vol. 10, iss. 4. – P. 601–615. – doi: 10.1109/84.967384.
8. **Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г.** Расчет электрической емкости. – Л.: Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1981. – 288 с.
9. **Krylov S., Harari I., Cohen Y.** Stabilization of electrostatically actuated microstructures using parametric excitation // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. – 2005. – Vol. 15, no. 6. – P. 1188–1204. – doi: 10.1088/0960-1317/15/6/009.
10. **Fargas-Marques A., Casals- Terré J., Shkel A.M.** Resonant pull-in condition in parallel-plate electrostatic actuators // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 2007. – Vol. 16, iss. 5. – P. 1044–1053. – doi: 10.1109/JMEMS.2007.900893.
11. **Драгунов В.П., Остертак Д.И.** Расчет латеральной составляющей электростатической силы в МЭМС // *Научный вестник НГТУ*. – 2009. – № 1 (34). – С. 229–232.
12. **Драгунов В. П., Остертак Д.И.** Расчет нормальной составляющей электростатической силы в МЭМС // *Сборник научных трудов НГТУ*. – 2009. – № 1 (55). – С. 40–45.
13. **Доржиев В.Ю., Драгунов В.П., Остертак Д.И.** Расчет емкости МЭМС в 2D-приближении // *Сборник научных трудов НГТУ*. – 2010. – № 4 (62). – С. 73–80.

FRINGING FIELD EFFECTS INFLUENCE ON MEMS FUNCTIONING

Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

At the development and fabrication of electrostatic MEMS is necessary to estimate of capacitances and electrostatic forces between the various parts of structure. These parameters can be calculated using various approaches. The most common is an approach in which fringing field effects are not taken into account, however, it leads to large errors in the case where the inter-electrode gap is comparable with the linear dimensions of electrodes. The using of CAD based on finite or boundary elements methods provides more accurate estimations, however, it requires a large amount of time and powerful computing, as well as difficult to further process optimization and designing. At the initial stages MEMS design requires fast and visual methods for calculating electrostatic interactions. So much interest to find analytical expressions, allowing calculating the

capacitance and forces with sufficiently for practical applications precision. This paper presents the results of experimental and theoretical research of electrostatic interactions in MEMS with parallel-plate electrodes. The dependences of capacitance and electrostatic force from the inter-electrode gap with regard to their dimensions and charge redistribution in 2D-approach was calculated. A comparison of the experimental and theoretical results was carried out. We give approximation formulas for the calculation of capacitance and electrostatic forces, taking into account fringing field effects. The limits of applicability of formulas that take into account fringing field effects in 2D-approach were estimated.

Keywords: MEMS, capacitance, fringing fields, area method, boundary element method, approximation formulas.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-48-61

REFERENCES

1. Palmer H.B. Capacitance of a parallel-plate capacitor by the Schwartz-Christoffel transformation. *Electrical Engineering*, 1937, vol. 56, iss. 3, pp. 363–368. doi: 10.1109/EE.1937.6540485
2. Elliot R.S. *Electromagnetics: history, theory, and applications*. New York, McGraw-Hill, 1966. 631 p.
3. Osterberg P.M., Senturia S.D. M-TEST: a test chip for MEMS material property measurement using electrostatically actuated test structures. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1997, vol. 6, iss. 2, pp. 107–118. doi: 10.1109/84.585788
4. Huang J.-M., Liew K.M., Wong C.H., Rajendran S., Tan M.J., Liu A.Q. Mechanical design and optimization of capacitive micromachined switch. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, vol. 93, iss. 3, pp. 273–285. doi: 0.1016/S0924-4247(01)00662-8
5. Leus V., Elata D. Fringing field effect in electrostatic actuators. *Technical Report ETR*, 2004, vol. 2, pp. 2–15.
6. Dragunov V.P., Kolchuzhin V.A., Ostertak D.I. Vliyanie kraevykh effektov na elektricheskuyu emkost' v MEMS [Fringing field effect on electric capacitance in MEMS]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2009, no. 2 (13), pp. 97–105.
7. Nemirovsky Y., Bochobza-Degani O. A methodology and model for the pull-in parameters of electrostatic actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2001, vol. 10, iss. 4, pp. 601–615. doi: 10.1109/84.967384
8. Iossel' Yu.Ya., Kochanov E.S., Strunskii M.G. *Raschet elektricheskoi emkosti* [Electric capacitance calculation]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 288 p.
9. Krylov S., Harari I., Cohen Y. Stabilization of electrostatically actuated microstructures using parametric excitation. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, vol. 15, no. 6, pp. 1188–1204. doi: 10.1088/0960-1317/15/6/009
10. Fargas-Marques A., Casals- Terré J., Shkel A.M. Resonant pull-in condition in parallel-plate electrostatic actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2007, vol. 16, iss. 5, pp. 1044–1053. doi: 10.1109/JMEMS.2007.900893
11. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Raschet lateral'noi sostavlyayushchei elektrostatičeskoj sily v MEMS [The calculation of lateral electrostatic force component of MEMS]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2009, no. 1 (34), pp. 229–232.
12. Dragunov V.P., Ostertak D.I. Raschet normal'noi sostavlyayushchei elektrostatičeskoj sily v MEMS [Calculation of the normal component of the electrostatic force in MEMS]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2009, no. 1 (55), pp. 40–45.
13. Dorzhiev V.Yu., Dragunov V.P., Ostertak D.I. Raschet emkosti MEMS v 2D-priblizhenii [Calculation of MEMS capacity in 2D-approximation]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2010, no. 4 (62), pp. 73–80.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Драгунов Валерий Павлович – родился в 1947 году, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры ППИМЭ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нанозлектроника, физика низкоразмерных структур, нано- и микросистемная техника. Опубликовано более 140 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: drag@adm.nstu.ru).

Dragunov Valery Pavlovich (b. 1947) – Doctor of Science (Eng.), Assistant Professor, Professor at the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nanoelectronics, physics of low-dimensional structures, nano- and microsystem technology. He is the author of more than 140 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. E-mail: drag@adm.nstu.ru).



Доржиев Виталий Юрьевич – родился в 1988 году, аспирант кафедры ППИМЭ Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: нано- и микросистемная техника. Опубликовано более 15 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: b.dorzhiev@gmail.com, dorzhiev@corp.nstu.ru).

Dorzhiev Vitaly Yuryevich (b. 1988) – PhD student at the Department of Semiconductor Devices and Microelectronics in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on nano- and microsystem technology. He is the author of more than 15 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. E-mail: b.dorzhiev@gmail.com, dorzhiev@corp.nstu.ru).

*Статья поступила 05 марта 2016 г.
Received March 05, 2016*

To Reference:

Dragunov V.P., Dorzhiev V.Yu. Vliyanie kraevykh jeffektov na funkcionirovanie MJeMS [Fringing field effects influence on MEMS functioning]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 1 (30), pp. 48–61. doi: 10.17212/1727-2769-2016-1-48-61

УДК 538.945

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ
КРИОГЕННОГО МАЛОШУМЯЩЕГО SiGe УСИЛИТЕЛЯ
ПРИ СУБКЕЛЬВИНОВЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ****Б.И. Иванов¹, И.Л. Новиков¹, Д.В. Пономарев¹,
А.Н. Султанов¹, А.Г. Вострецов¹, Е.В. Ильичев^{1,2}**¹*Новосибирский государственный технический университет*²*Лейбниц, Институт фотонных технологий*

В данной работе представлен результат экспериментального исследования малошумящего криогенного двухкаскадного усилителя на основе гетероструктурных биполярных SiGe транзисторов. Показаны амплитудно-частотные характеристики усилителя при различных температурных режимах работы и различных режимах питания усилителя при фиксированных температурах. Приведены основные характеристики такого типа усилителя при температурах от 4,2 К до 300 мК. Приводятся характеристики коэффициента усиления при температуре менее 300 мК. Экспериментально показано, что разработанный усилитель обеспечивает $|S_{21}|$, соответствующий 15 дБ в диапазоне частот от 100 МГц до 4 ГГц при температуре эксперимента 350 мК.

Ключевые слова: криогенный усилитель, малошумящий усилитель, усилитель с малой мощностью рассеяния, измерение слабых сигналов, измерение квантовых устройств.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-62-72

Введение

Современный уровень производства устройств твердотельной электроники позволяет разрабатывать структуры с предельно низкими шумовыми характеристиками. Такие устройства являются основой при проектировании малошумящих систем измерений. Они особо актуальны при измерении твердотельных структур с квантовой чувствительностью. Примером таких структур являются сверхпроводниковые квантовые биты [1–3], которые явно демонстрируют квантовые свойства. Известно, что квантовые свойства наблюдаемы при сверхнизких температурах. Поэтому требуется использовать глубокое охлаждение. Так как собственные характерные частоты кубитов, как правило, лежат в микроволновом диапазоне частот, то для их измерения необходимы температуры ниже 100 мК. Уровень мощности сигнала на выходе таких структур не детектируется современными комнатными измерительными устройствами, и задача разработки криогенных малошумящих усилителей (МШУ) является актуальной для квантовых измерений. Более того, микроволновый тракт имеет прямые потери, в связи с этим уровень измеряемого сигнала снижается линейно в зависимости от длины тракта [4]. Появляется потребность в размещении малошумящих усилителей мощности в непосредственной близости от исследуемого сверхпроводникового образца, расположенного при субкельвиновых температурах. С другой стороны, минимальная

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания, проект № 8.337.2014/К и РФФИ, проект 14-02-31601 мол_а.

© 2016 Б.И. Иванов, И.Л. Новиков, Д.В. Пономарев, А.Н. Султанов, А.Г. Вострецов, Е.В. Ильичев

рабочая температура усилителя ограничена его тепловыделением и физическими свойствами его активных элементов. Развитие технологии изготовления таких устройств и особенности их работы при субкельвиновых температурах формируют новые задачи по развитию считывающей криогенной электроники.

Особый интерес в криогенной электронике представляют транзисторы с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ, от англ. НЕМТ). Уникальные характеристики НЕМТ и его улучшенного варианта РНЕМТ (псевдоморфного НЕМТ) вытекают из свойств двумерного электронного газа. Благодаря своим особенностям эти устройства способны работать на сверхвысоких частотах, обеспечивая линейный коэффициент усиления в широкой полосе частот, а также сохраняют свою работоспособность при криогенном охлаждении. Немаловажной особенностью НЕМТ-транзисторов является малая шумовая температура, что делает выгодным их использование в экспериментах, требующих высокой чувствительности.

В статье [5] авторами был разработан криогенный трехкаскадный усилитель на коммерческих РНЕМТ GaAs-транзисторах ATF-35143 фирмы Agilent Technologies, предназначенный для мегагерцового частотного диапазона и функционирующий при температуре окружающей среды около 380 мК. Его минимальная шумовая температура $T_{ш}$ составляет значение около 100 мК при частотах 1...4 МГц с минимумом в 90 мК при 2,5 МГц. Потребляемая мощность усилителя находится в диапазоне 100...300 мкВт. Однако, как и ожидалось авторами статьи, НЕМТ-транзисторы оказались непригодны для чувствительных измерений на частотах ниже 1 МГц вследствие высокого значения точки спада $1/f$ шума (около 300 кГц), вызванного фликкер-шумом GaAs-транзисторов. Повышение шумовой температуры на частотах выше 4 МГц происходит вследствие рассогласования между входным импедансом транзистора и импедансом входной цепи.

В статье [6] авторы использовали арсенид-галлиевые полевые транзисторы (GaAs JFETs) фирмы SONY в качестве основы для разработки емкостного трансимпедансного усилителя, используемого в качестве считывающего устройства с детекторов на основе сверхпроводящих туннельных переходов. Была продемонстрирована работоспособность усилителя при криогенных температурах вплоть до 0,3 градусов Кельвина с уровнем энергопотребления в несколько микроватт, без криогенных аномалий и низким уровнем шума.

В статье [7] авторами был разработан криогенный усилитель, основанный на РНЕМТ-транзисторах ATF-36077 фирмы Agilent Technologies, имеющий шумовую температуру около 200 мК при внешней температуре охлаждения 300 мК. Таким образом, НЕМТ-транзисторы обоснованно могут считаться подходящими кандидатами для использования в криогенных МШУ при работе в субкельвиновом диапазоне температур.

Параллельно с НЕМТ-технологией, за последние 20 лет значительно улучшилась биполярная технология на гетеропереходах. Созданные по такой технологии SiGe-транзисторы способны так же, как и НЕМТ-транзисторы, работать при криогенных температурах и обеспечивать постоянный коэффициент усиления на частотах до десятков ГГц. С другой стороны, гетероструктурные биполярные транзисторы (ГБТ) имеют малое эквивалентное шумовое сопротивление и могут быть использованы для измерений в сверхпроводящих цепях с низким выходным полным характеристическим сопротивлением. В отличие от НЕМТ-усилителей у них меньше коэффициент усиления, однако этот недостаток компенсируется лучшей стабильностью и меньшим фазовым шумом. В частности, в статье [8] приводится экспериментальное подтверждение работы криогенного усилителя на основе SiGe ГБТ при температуре эксперимента 4,2 К, шумовая температура которого составляет менее 2 К, а эквивалентное шумовое сопротивление – 50 Ом.

Преимуществом SiGe ГБТ является возможность их использования для низкочастотных применений вплоть до нескольких единиц герц. До недавнего времени криогенные усилители на основе SiGe ГБТ применялись только для температур от 4,2 градуса Кельвина (температура жидкого гелия) и выше, и не было данных о работоспособности схем на SiGe ГБТ при более низких температурах. Первые результаты их работоспособности в субкельвиновом диапазоне температур были опубликованы в статье [9], авторы которой использовали транзисторы первого поколения SiGe БиКМОП технологии IBM SiGe 5AM. Представленные в статье выходные вольт-амперные характеристики для температур 4 К, 1,4 К и 252 мК при токах базы 40...100 нА показывают стабильную работу транзисторов при субкельвиновых температурах, тем не менее конечного применения этих транзисторов в схемах криогенных МШУ не показано.

В статье [10] экспериментально подтверждена работа широкополосного криогенного усилителя мощности на основе SiGe ГБТ при 800 мК в составе считывающей системы для измерения свойств сверхпроводниковых кубитов. Основу усилителя составили транзисторы VFP 640 фирмы Infineon. Полученные в ходе эксперимента данные показали, что в полосе от 100 МГц до 4 ГГц коэффициент усиления составил 35 дБ при температуре эксперимента 800 мК. Таким образом, показано, что SiGe ГБТ могут использоваться в качестве широкополосных криогенных усилителей наряду с НЕМТ-технологией при охлаждении до субкельвиновых температур для считывания информации квантовых структур.

В данной работе мы демонстрируем работоспособность криогенного МШУ на основе SiGe ГБТ при температурах охлаждения ниже 800 мК. Приводятся его основные параметры для различных температурных режимов работы усилителя. Данный усилитель предназначен для экспериментального исследования свойств сверхпроводниковых кубитов и сверхпроводящих структур на их основе в полосе частот 100 МГц...4 ГГц. Проводится экспериментальное исследование двухкаскадного криогенного усилителя. Целью данной работы является исследование работоспособности представленного криогенного усилителя при различных рабочих температурах и различных режимах питания усилителя.

1. Экспериментальное исследование SiGe МШУ

Основным требованием для обеспечения высокой чувствительности усилителя мощности, предназначенного для работы со сверхпроводниковыми квантовыми битами и другими квантовыми структурами на их основе, является низкий шум первого каскада усиления. По этой причине выбор транзистора является очень важной задачей. В результате сравнительного анализа за основу усилителя был выбран гетероструктурный биполярный транзистор VFP640 фирмы Infineon, характеризующийся максимальной частотой перехода $f_t = 42$ GHz и минимальным коэффициентом шума $NF_{\min} = 0,65$ дБ. Схема усилителя выбрана аналогично схеме из работы [8], которая показала стабильные характеристики усилителя с малым уровнем собственных шумов и малой мощностью рассеяния.

В экспериментах по измерению слабых сигналов от сверхпроводникового кубита использовался измерительный стенд, описанный в статье [4]. Основным оборудованием для проведения экспериментов были векторный анализатор цепей ZVL13 фирмы Rohde & Schwarz и рефрижератор растворения. Было выполнено измерение передаточных параметров двухкаскадного МШУ при фиксированной температуре 4,2 К и при пошаговом понижении температуры рефрижератора охлаждения от 4,2 К до 140 мК.

Экспериментальная зависимость матрицы рассеяния $|S_{21}|$ от частоты в рабочем диапазоне частот при различных напряжениях питания V_s представлена на

рис. 1. Как видно из рисунка, диапазон коэффициентов усиления по напряжению при фиксированной температуре 4,2 К для различных режимов питания мощностей рассеивания составляет от 10 до 15 дБ в полосе частот от 100 МГц до 4 ГГц. При увеличении V_s более 1,3 В наблюдается спад коэффициента усиления усилителя, что характерно и для питания ниже 1,2 В. Напряжения питания выбраны из условия максимального и минимального усиления и являются оптимальными. В связи с этим для данного усилителя выбран этот диапазон рабочих напряжений. Для всех экспериментов уровень входной мощности усилителя соответствовал – 80 дБм (10^{-11} Вт) и является на несколько порядков ниже динамического диапазона усилителя.

Было проведено экспериментальное исследование усилителя при температурах ниже 400 мК. Для этого диапазона температур диапазон коэффициентов усиления по напряжению для различных режимов питания мощностей рассеивания составляет в среднем от 7 до 15 дБ для полосы частот от 100 МГц до 4 ГГц. Мощность охлаждения в рефрижераторе растворения ограничена: чем ниже температура эксперимента, тем ниже мощность охлаждения. При наличии источника тепловой энергии конечная рабочая температура рефрижератора может отличаться от номинальной. На рис. 2 показана характеристика усилителя при различных пяти напряжениях питания и фиксированной мощности охлаждения криостата (фиксированной температуре в 100 мК). В данном случае температура рефрижератора увеличивалась при увеличении напряжения питания до 1,3 В (максимальный коэффициент усиления). Таким образом, коэффициент усиления для разработанного усилителя слабо зависит от рабочей температуры в температурном диапазоне ниже 4,2 К.

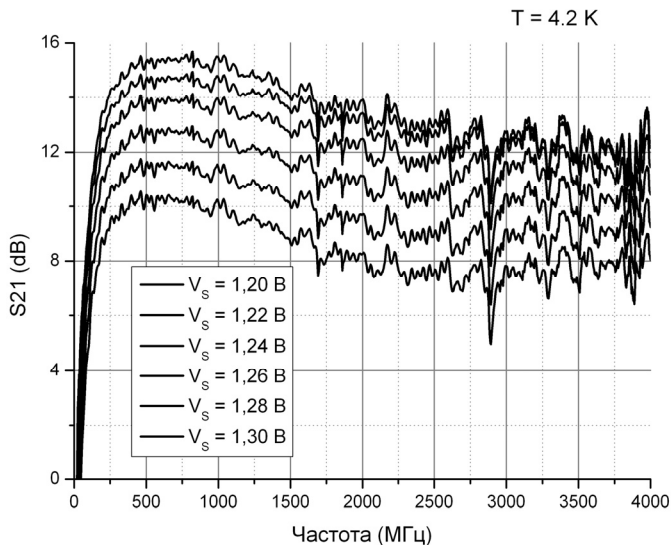


Рис. 1 – Зависимость коэффициента матрицы рассеяния $|S_{21}|$ криогенного усилителя от частоты для различных напряжений питания V_s при температуре 4,2 К. Верхняя кривая соответствует напряжению питания 1,3 В; нижняя кривая соответствует напряжению питания 1,2 В

Fig. 1 – Transmission curve $|S_{21}|$ of the cryogenic amplifier for different power supply voltages at 4,2 K. The upper curve corresponds to power supply voltage of 1,3 V, downer curve corresponds to power supply voltage of 1,2 V

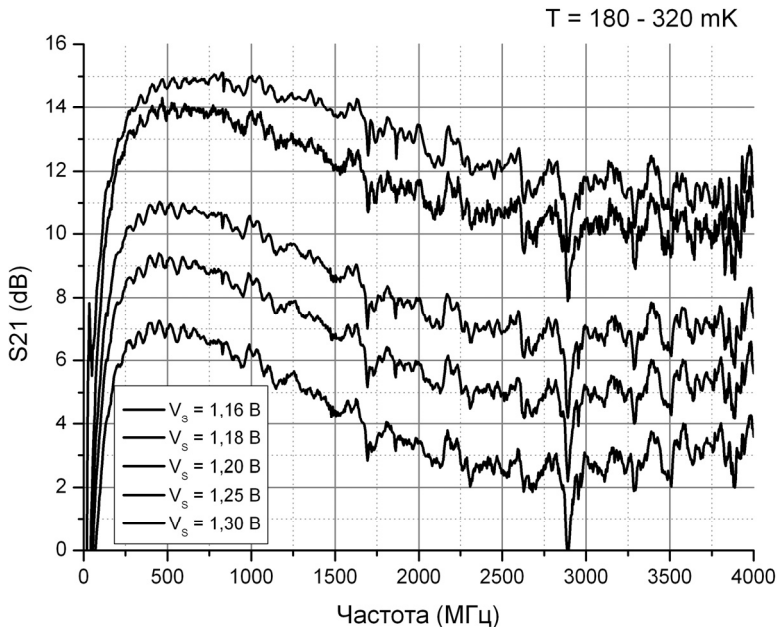


Рис. 2 – Зависимость коэффициента $|S_{21}|$ криогенного усилителя от частоты для различных напряжений питания. Температура рефрижератора установлена на отметку 100 мК. Верхняя кривая соответствует напряжению питания 1,3 В; нижняя кривая соответствует напряжению питания 1,16 В

Fig. 2 – Transmission curve $|S_{21}|$ of the cryogenic amplifier for different power supply voltages. The dilution unit temperature was set to 100 mK. The upper curve corresponds to power supply voltage of 1,3 V, downer curve corresponds to power supply voltage of 1,16 V

Сравнительный анализ зависимости коэффициента матрицы рассеяния $|S_{21}|$ от рабочей температуры усилителя в области субкельвиновых температур при фиксированной частоте 2,5 ГГц показан на рис. 3. В ходе данного эксперимента варьировалось напряжение питания (диапазон показан на рис. 4), что изменяло мощность рассеяния и рабочую температуру рефрижератора. Сравнительный анализ экспериментальных кривых коэффициента $|S_{21}|$, полученный при фиксированной частоте 2,5 ГГц от напряжения питания показан на рис. 4. Рабочая температура рефрижератора показана на рис. 3.

Как видно из приведенной характеристики, коэффициент $|S_{21}|$ слабо меняется в зависимости от рабочей температуры в диапазоне ниже 4,2 К. Это показывает, что разработанный усилитель с данным типом транзисторов оказывается работоспособным в субкельвиновом диапазоне температур, что до настоящего момента не представлено в научных работах ведущих мировых групп.

Была проведена оценка выделяемой мощности криогенного усилителя. При каждом значении напряжения питания фиксировалась рабочая температура рефрижератора. После проведения шумовых измерений криогенный усилитель был отключен и выполнялось измерение значения мощности охлаждения рефрижератора в стандартном режиме мощности испарения смеси PSTILL = 12 мВт при разных рабочих температурах. Для задания разных рабочих температур использовался нагреватель рабочей панели камеры смешивания и при достижении рефрижератором установленной рабочей температуры регистрировался ток, протекающий через известное сопротивление нагревателя. Полученная зависимость

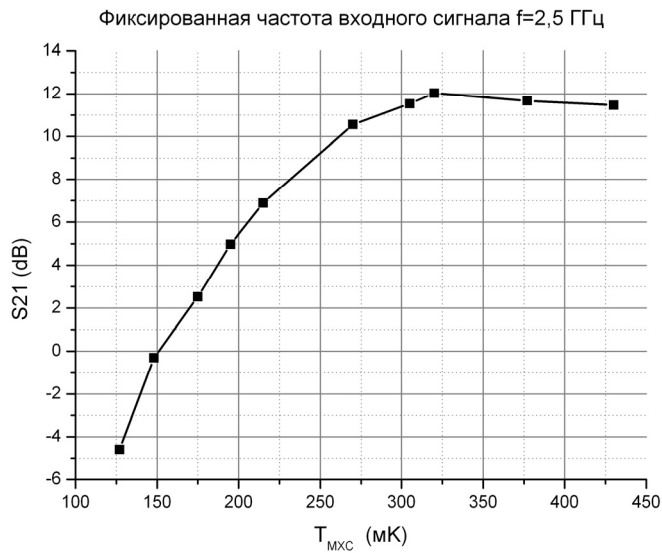


Рис. 3 – Зависимость коэффициента матрицы рассеяния $|S_{21}|$ от рабочей температуры усилителя на фиксированной частоте 2,5 ГГц

Fig. 3 – Transmission curve $|S_{21}|$ dependence on operating temperature at the fixed signal frequency 2,5 GHz

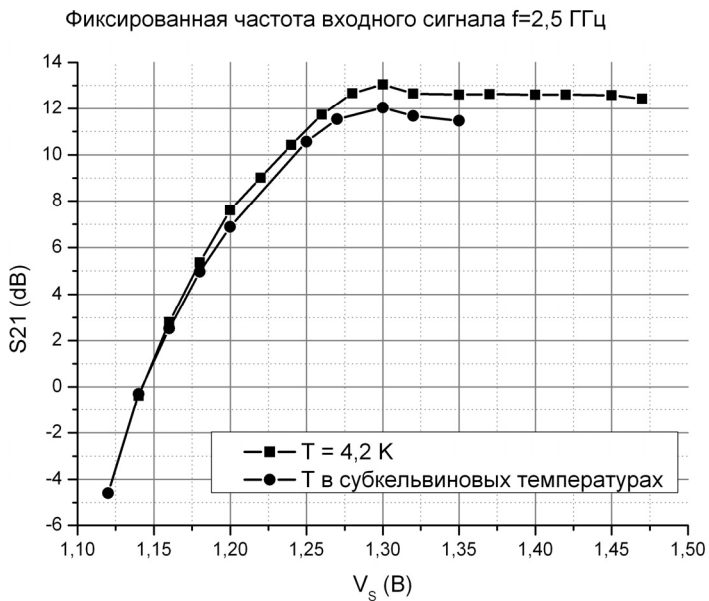


Рис. 4 – Зависимость коэффициента матрицы рассеяния $|S_{21}|$ от напряжения питания для разных температурных режимов работы усилителя на фиксированной частоте 2,5 ГГц

Fig. 4 – Transmission curve $|S_{21}|$ dependence on power supply voltage for different temperature regimes at the fixed signal frequency of 2,5 GHz

мощности охлаждения от рабочей температуры представлена на рис. 5. На рис. 6 показана линейная аппроксимирующая функция, по которой определялось значение мощности охлаждения рефрижератора при разных его рабочих температурах в моменты, когда криогенный усилитель находился в активном состоянии.

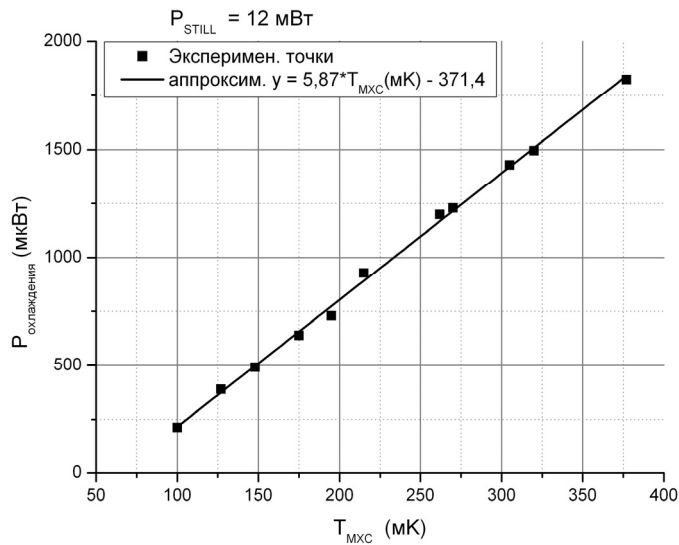


Рис. 5 – Зависимость мощности охлаждения рефрижератора от рабочей температуры

Fig. 5 – Refrigerator cooling power dependence on a working temperature

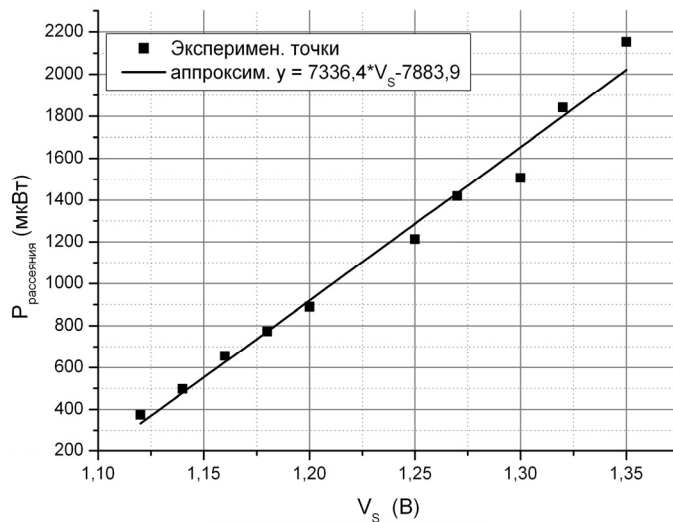


Рис. 6 – Зависимость мощности рассеяния усилителя от напряжения питания при субкельвиновых температурах

Fig. 6 – Amplifier power consumption dependence on power supply voltage at subKelvin temperatures

Таким образом, удалось получить выделяемую мощность усилителя при разных напряжениях питания. Эта зависимость представлена на рис. 6, где также указана аппроксимирующая функция, связывающая напряжение питания усилителя и выделяемую мощность. Данная зависимость показывает сильное возрастание мощности рассеивания криогенного усилителя от приложенного напряжения питания, что потребовало оценки охлаждающей возможности рефрижератора при максимальных его рабочих параметрах.

Проведенное измерение максимальной мощности охлаждения рефрижератора при рабочей температуре 100 мК показало 500 мкВт при максимальной мощности испарения смеси PSTILL = 30 мВт. Эта максимальная величина мощности охлаждения соответствует низкому значению напряжения питания $V_s = 1,14$ В, при котором транзисторы находятся в резистивном состоянии и усилитель имеет высокий уровень шума и малое усиление. В рабочем режиме усилителя при минимальном уровне шума и максимальном коэффициенте усиления выделяемая мощность составляет 1,5 мВт, что приводит к температуре рефрижератора выше 100 мК. Поэтому возможность работы данного усилителя непосредственно рядом со сверхпроводниковым кубитом при рабочих температурах кубита ниже 100 мК нежелательна из-за высокой выделяемой мощности усилителя. Следовательно, для проведения экспериментов со сверхпроводниковыми структурами при температурах ниже 100 мК предполагается поместить усилитель на близлежащих панелях, имеющих более высокое значение мощности охлаждения. Такой панелью может быть панель испарения смеси с мощностью охлаждения несколько мВт и рабочей температурой 800 мК [10].

Заключение

В данной работе проведено экспериментальное исследование МШУ мощности при различных субкельвиновых температурах. Для данного диапазона температур получены максимальные и минимальные мощности рассеяния при положительном коэффициенте усиления. Для минимального коэффициента усиления, равного 3 дБ, на фиксированной частоте 2,5 ГГц была достигнута минимальная рабочая температура 175 мК при мощности рассеяния 650 мкВт. Максимальный коэффициент $|S_{21}|$ на фиксированной частоте 2,5 ГГц, равный 12 дБ, соответствует минимальной рабочей температуре 320 мК при мощности рассеяния 1,5 мВт. Приведенные данные подтверждают целесообразность использования представленного усилителя для экспериментов со сверхпроводниковыми структурами, а также возможность установки криогенных МШУ на более низких этапах охлаждения, чем обычная температура 4,2 К. Более того, малая мощность рассеивания позволяет увеличить число измерительных трактов за счет увеличения общего числа усилителей в криостате до нескольких десятков. Это также является актуальным при усилении сигналов в радиоастрономии, где количество каналов определяет качество принимаемого сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Josephson persistent-current qubit / J.E. Mooij, T.P. Orlando, L. Levitov, L. Tian, C.H. van der Wal, S. Lloyd // *Science*. – 1999. – Vol. 285, N 5430. – P. 1036–1039. – doi: 10.1126/science.285.5430.1036.
2. Weak continuous monitoring of a flux qubit using coplanar waveguide resonator / G. Oelsner, S.H.W. van der Ploeg, P. Macha, U. Hübner, D. Born, E. Il'ichev, H.-G. Meyer, M. Grajcar, S. Wünsch, M. Siegel, A.N. Omelyanchouk, O. Astafiev // *Physical Review B*. – 2010. – Vol. 81, iss. 17. – Art. 172505. – doi: 10.1103/PhysRevB.81.172505.

3. Evidence for entangled states of two coupled flux qubits / A. Izmailov, M. Grajcar, E. Il'ichev, Th. Wagner, H.-G. Meyer, A.Yu. Smirnov, M.H.S. Amin, A.M. van den Brink, A.M. Zagoskin // *Physical Review Letters*. – 2004. – Vol. 93, iss. 3. – Art. 037003. – doi: 10.1103/PhysRevLett.93.037003.
4. Экспериментальное исследование шумовых свойств измерительного микроволнового тракта сверхпроводящих квантовых цепей / И.Л. Новиков, Б.И. Иванов, А.В. Кривецкий, П.С. Щекин, Е.В. Ильичев, А.Г. Вострецов // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2015. – № 1 (26). – С. 52–65. – doi: 10.17212/1727-2769-2015-1-52-65.
5. Low noise, low power consumption high electron mobility transistors amplifier, for temperatures below 1 K / N. Oukhanski, M. Grajcar, E. Il'ichev, H.-G. Meyer // *Review of Scientific Instruments*. – 2003. – Vol. 74, iss. 2. – Art. 1145. – doi: 10.1063/1.1532539.
6. Cryogenic GaAs readout circuits for low temperature detectors / H. Nagata, J. Kobayashi, H. Matsuo, M. Akiba, M. Fujiwara // *Proceedings of the XXVIIIth URSI General Assembly in New Delhi (October 2005)*. – JB-P. 9. – Art. 0257.
7. **Korolev A.M., Shnyrkov V.I., Shulga V.M.** Note: Ultra-high frequency ultra-low dc power consumption HEMT amplifier for quantum measurements in millikelvin temperature range // *Review of Scientific Instruments*. – 2011. – Vol. 82. – Art. 016101. – doi: 10.1063/1.3518974.
8. **Иванов Б.И.** Экспериментальное исследование криогенных усилителей на основе SiGe биполярных транзисторов при температуре 4,2 К // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2014. – № 1 (22). – С. 73–82.
9. Sub-1-K Operation of SiGe transistors and circuits / L. Najafizadeh, J.S. Adams, S.D. Phillips, K.A. Moen, J.D. Cressler, S. Aslam, T.R. Stevenson, R.M. Meloy // *IEEE Electron Device Letters*. – 2009. – Vol. 30, N 5. – P. 508–510. – doi: 10.1109/LED.2009.2016767.
10. Микроволновый криогенный малошумящий гетероструктурный SiGe усилитель / Б.И. Иванов, М. Грайцар, И.Л. Новиков, А.Г. Вострецов, Е.В. Ильичев // *Письма в ЖТФ*. – 2016. – Т. 42, № 7. – С. 90–97.

THE EXPERIMENTAL STUDY OF CRYOGENIC LOW NOISE SiGe AMPLIFIER AT SUBKELVIN TEMPERATURES

**Ivanov B.I.¹, Novikov I.L.¹, Ponomarev D.V.¹,
Sultanov A.N.¹, Vostretsov A.G.¹, Il'ichev E.V.^{1,2}**

¹*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

²*Leibniz Institute of Photonic Technology, Jena, Germany*

In this paper we demonstrate experimental study of cryogenic two stage low noise amplifier based on SiGe bipolar transistors for subkelvin temperature ranges. We show gain curves for different cryogenic temperatures from 4,2 K down to 300 mK. The detailed transmission curves for a temperature range from 300 mK down to 150 mK is presented. The maximum gain at the 350 mK temperature corresponds to 15 dB for 100 MHz- 4GHz frequency range.

Keywords: cryogenic amplifier, low noise amplifier, low power dissipation amplifier, weak signal amplification, quantum circuits measurements.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-62-72

REFERENCES

1. Mooij J.E., Orlando T.P., Levitov L., Tian L., Wal C.H. van der, S. Lloyd. Josephson persistent-current qubit. *Science*, 1999, vol. 285, no. 5430, pp. 1036–1039. doi: 10.1126/science.285.5430.1036
2. Oelsner G., Ploeg S.H.W. van der, Macha P., Hübner U., Born D., Il'ichev E., Meyer H.-G., Grajcar M., Wunsch S., Siegel M., Omelyanchouk A.N., Astafiev O. Weak continuous monitoring of a flux qubit using coplanar waveguide resonator. *Physical Review B*, 2010, vol. 81, iss. 17, art. 172505. doi: 10.1103/PhysRevB.81.172505

3. Izmalkov A., Grajcar M., Il'ichev E., Wagner Th., Meyer H.-G., Smirnov A.Yu., Amin M.H.S., Brink A.M. van den, Zagoskin A.M. Evidence for entangled states of two coupled flux qubits. *Physical Review Letters*, 2004, vol. 93, iss. 3, art. 037003. doi: 10.1103/PhysRevLett.93.037003
4. Novikov I.L., Ivanov B.I., Krivetskii A.V., Schekin P.S., Il'ichev E.V., Vostretsov A.G. Eksperimental'noe issledovanie shumovykh svoystv izmeritel'nogo mikrovolnovogo trakta sverkhprovodyashchikh kvantovykh tsepei [Experimental study of noise parameters in a microwave measurement system for flux qubit readout]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 1 (26), pp. 52–65. doi: 10.17212/1727-2769-2015-1-52-65
5. Oukhanski N., Grajcar M., Il'ichev E., Meyer H.-G. Low noise, low power consumption high electron mobility transistors amplifier, for temperatures below 1 K. *Review of Scientific Instruments*, 2003, vol. 74, iss. 2, art. 1145. doi: 10.1063/1.1532539
6. Nagata H., Kobayashi J., Matsuo H., Akiba M., Fujiwara M. Cryogenic GaAs readout circuits for low temperature detectors. *Proceedings of the XXVIIIth URSI General Assembly in New Delhi*, 2005, JB-P. 9, art. 0257.
7. Korolev A.M., Shnyrkov V.I., Shulga V.M. Note: Ultra-high frequency ultra-low dc power consumption HEMT amplifier for quantum measurements in millikelvin temperature range. *Review of Scientific Instruments*, 2011, vol. 82, art. 016101. doi: 10.1063/1.3518974
8. Ivanov B.I. Eksperimental'noe issledovanie kriogennykh usilitelei na osnove SiGe bipolyarnykh tranzistorov pri temperature 4,2 K [Experimental study of cryogenic SiGe bipolar transistors at 4.2 K]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 1 (22), pp. 73–82.
9. Najafizadeh L., Adams J.S., Phillips S.D., Moen K.A., Cressler J.D., Aslam S., Stevenson T.R., Meloy R.M. Sub-1-K Operation of SiGe transistors and circuits. *IEEE Electron Device Letters*, 2009, vol. 30, no. 5, pp. 508–510. doi: 10.1109/LED.2009.2016767
10. Ivanov B.I., Graitsar M., Novikov I.L., Vostretsov A.G., Il'ichev E.V. Mikrovolnovyi kriogennyi maloshumyashchii geterostrukturnyi SiGe usilitel' [The microwave low-noise cryogenic heterostructure SiGe amplifier]. *Pis'ma v ZhTF – Technical Physics Letters*, 2016, vol. 42, no. 7, pp. 90–97.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Иванов Борис Игоревич – родился в 1986 году, канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории криогенной квантовой электроники НГТУ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, проспект Карла Маркса 20. E-mail: to_ivanov_boris@yahoo.com).

Ivanov Boris (b. 1986) – PhD (Eng.), senior research worker in the cryogenic quantum electronics laboratory, Novosibirsk State Technical University. He is author of 12 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: to_ivanov_boris@yahoo.com).



Новиков Илья Леонидович – родился в 1969 году, канд. техн. наук, доцент кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники, научный сотрудник межфакультетской лаборатории криогенной квантовой электроники НГТУ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, проспект Карла Маркса 20. E-mail: ilya_novikov@mail.ru).

Novikov Ilya (b. 1969) – PhD (Eng.), associate professor, department of semiconductor devices and microelectronics, senior research worker in the cryogenic quantum electronics laboratory, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on applied superconductivity, superconducting quantum. He is author of more than 20 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: ilya_novikov@mail.ru).



Пономарев Дмитрий Викторович – родился в 1993 году, младший научный сотрудник лаборатории криогенной квантовой электроники НГТУ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, проспект Карла Маркса 20. E-mail: dmitry-ponomarev93@mail.ru).

Ponomarev Dmitry (b. 1993) – junior scientist of cryogenic quantum electronics laboratory in Novosibirsk State Technical University. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: dmitry-ponomarev93@mail.ru).



Султанов Айдар Наильевич родился в 1991 году, лаборант кафедры прикладной и теоретической физики, м.н.с. лаборатории квантовой криогенной электроники НГТУ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, проспект Карла Маркса 20. E-mail: sultanov.aydar@ngs.ru).

Sultanov Aydar (b.1991) lab assistant in NSTU, Department of Applied and Theoretical Physics (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sultanov.aydar@ngs.ru).



Вострецов Алексей Геннадьевич – родился в 1955 году, д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: методы статистической обработки сигналов. Опубликовано свыше 150 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: vostretsov@adm.nstu.ru).

Vostretsov Aleksey G. (b. 1955) – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, the vice-rector for research at Novosibirsk State Technical University. His main field of research is the statistical theory of signal processing in conditions of a priori uncertainty. He has been working in this field since 1980. He has over 150 publications, including 3 monographs (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: vostretsov@adm.nstu.ru).



Ильичев Евгений Вячеславович – родился в 1957 году, д-р физ.-мат. наук, профессор лаборатории криогенной квантовой электроники НГТУ. Руководитель группы «Макроскопические квантовые системы» в Институте фотонных технологий, г. Йена, Германия. (E-mail: evgeni.ilichev@ipht-jena.de).

Il'ichev Evgeniy V. (b. 1957) – Ph.D., professor, cryogenic quantum electronics laboratory in NSTU; group leader in the macroscopic quantum systems laboratory at the Leibniz Institute of Photonic Technology, Jena, Germany. He is author of over 50 publications cited to Web of Science, including 2 monographs. His research interests are currently focused on macroscopic quantum systems and superconducting quantum bits. (E-mail: evgeni.ilichev@ipht-jena.de)

Статья поступила 09 декабря 2015 г.

Received December 09, 2015

To Reference:

Ivanov B.I., Novikov I.L., Ponomarev D.V., Sultanov A.N., Vostretsov A.G., Il'ichev E.V. Eksperimental'noe issledovanie svoystv kriogenного maloshumyashchego SiGe usilitelya pri subkel'vinovykh temperaturakh [The experimental study of cryogenic low noise SiGe amplifier at subkelvin temperatures]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 1 (30), pp. 62–72. doi: 10.17212/1727-2769-2016-1-62-72

УДК 621.394

К ВОПРОСУ АНАЛИЗА ДИСЦИПЛИНЫ ПРИОРИТЕТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРИ МНОГОУРОВНЕВОМ УПРАВЛЕНИИ СЕТЯМИ СВЯЗИ

В.И. Мейкшан

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики

В статье рассматривается метод анализа иерархической системы управления сетями связи (СУСС) с использованием аппарата сетей массового обслуживания (СеМО). Структура исследуемой СУСС соответствует концепции TMN (Telecommunications Management Network), которая получила широкое распространение при создании комплексных систем управления крупномасштабными сетями связи. Предлагаемый подход включает этапы построения функциональной модели исследуемой системы и ее математического описания с последующей оценкой показателей, которые характеризуют время реакции (ответа) системы на внешние команды управления, связанные с задачами технического обслуживания и эксплуатации сети. При этом учитывается несколько категорий важности (относительных приоритетов) управляющих команд. Подробно описана функциональная модель, которая построена как сеть очередей для обслуживания потоков внешних и внутренних заявок. При описании этой модели введены исходные параметры, учитываемые в процессе анализа СУСС: интенсивности поступления внешних заявок; коэффициенты распределения потоков внутренних заявок, циркулирующих между отдельными элементами СУСС (как в пределах одного уровня, так и между соседними уровнями); интенсивности обработки заявок из отдельных очередей. На основе условия глобального равновесия записана система линейных алгебраических уравнений, позволяющих найти полную интенсивность входного потока для каждой очереди в составе СеМО. Исходя из принципа декомпозиции СеМО, вычисляются локальные характеристики функционирования отдельных элементов СУСС. С учетом этих характеристик производится оценка показателей качества функционирования СУСС по отношению к потокам внешних заявок. Представлены результаты численных расчетов, которые демонстрируют, что приоритетная дисциплина распределения ресурсов обработки, имеющихся в составе элементов СУСС, более гибко учитывает существенные отличия в требованиях к допустимому времени реакции на управляющие запросы разных категорий.

Ключевые слова: сети связи, система управления, очереди заявок, относительные приоритеты, время реакции.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-73-83

Введение

В сфере управления современными сетями связи широкое распространение находит концепция TMN (Telecommunications Management Network), которая рекомендована Сектором телекоммуникаций Международного союза электросвязи (ITU-T). В соответствии с этой концепцией система управления, построенная для крупномасштабной сети, имеет иерархическую структуру и характеризуется следующими основными особенностями [1, 2]: 1) для выполнения функций непосредственного управления каждый элемент сети (Network Element – NE) снабжается собственным агентом; 2) управление некоторой группой сетевых элементов, образующих отдельный фрагмент (домен) сети, осуществляет подсистема EMS (Element Management System); 3) к самому верхнему уровню относится подсистема NMS (Network Management System), на которую возлагаются функции управления всей сетью.

При такой сложной структуре эффективная работа системы управления сетью связи (СУСС) во многом зависит от правильного сочетания большого числа факторов, поэтому проблемы анализа качества функционирования СУСС привлекают к себе постоянное внимание отечественных и зарубежных авторов. Наибольший интерес представляют работы, которые не ограничиваются отдельными частными задачами при сравнительно простых вариантах структуры, а моделируют процессы взаимодействия всех перечисленных элементов иерархии СУСС [3–8].

Особого внимания заслуживают работы [5–8], где применительно к многоуровневой архитектуре, которая полностью отвечает требованиям концепции ТМН, построена комплексная модель СУСС в классе сетей массового обслуживания (СеМО). В данной статье на основе этой модели рассматривается более сложная ситуация, когда поступающие в систему запросы являются неоднородными и характеризуются разными приоритетами (с учетом степени их важности для выполняемых задач управления).

Здесь важно учитывать постоянное развитие самого объекта управления, что проявляется в переходе от традиционных «моносервисных» сетей связи к современным мультисервисным сетям, а в перспективе – к сети следующего поколения (Next Generation Network – NGN). Это сопровождается увеличением объема данных, которые сохраняются и обрабатываются элементами СУСС, а также передаются между ними. Кроме того, возрастает число и разнообразие эксплуатационных ситуаций и управляющих воздействий. В таких условиях наряду с наращиванием ресурсов СУСС требуются новые методы оптимального управления этими ресурсами. В частности, алгоритмы обработки данных в элементах СУСС должны ориентироваться на разнородный характер поступающих запросов, которые отличаются разными требованиями к допустимому времени обслуживания. Следовательно, все более обоснованным становится применение дисциплин приоритетного обслуживания.

1. Функциональная модель СУСС

Общая структура СеМО, с помощью которой моделируется работа исследуемой СУСС, представлена на рис. 1 в укрупненном виде, т. е. на уровне «макроузлов», которые соответствуют перечисленным ранее элементам СУСС.

В дальнейшем при более подробном рассмотрении внутренней структуры этих «макроузлов» будут использоваться следующие обозначения:

- NI и NO – входная и выходная очереди подсистемы NMS , выполняющей функции главного центра управления сетью связи (ГЦУСС);
- EO_i и EO_i – входная и выходная очереди подсистемы EMS_i , которая установлена в одном из региональных центров управления (РЦУСС) и охватывает i -й фрагмент (домен) сети связи ($i = \overline{1, m}$);
- AI_{ij} и AO_{ij} – входная и выходная очереди в составе агента A_{ij} , который подчиняется подсистеме EMS_i ($i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n_i}$);
- QE_{ij} – очередь заявок к процессору эксплуатации и технического обслуживания (Operation and Maintenance Processor – OMP) для элемента сети NE_{ij} , который управляется подсистемой EMS_i ($i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n_i}$).

Функционирование подсистемы NMS (рис. 2) определяется следующими параметрами: 1) Λ_{NMS} – интенсивность поступления команд управления (внешний поток заявок) от персонала, который находится в ГЦУСС и имеет доступ к оборудованию;

дованию NMS ; 2) P_{NO} – вероятность того, что обработанная заявка из очереди NO покидает СУСС; с дополнительной вероятностью $P'_{NO} = 1 - P_{NO}$ после обработки заявок из очереди NO возникают внутренние заявки (например, реакция на уведомления от EMS); 3) P_i^{EI} – вероятность того, что обработанные заявки из очереди NI направляются в подсистему EMS_i ($i = \overline{1, m}$), либо (при $i = 0$) замыкаются в пределах NMS , т. е. переходят в очередь NO .

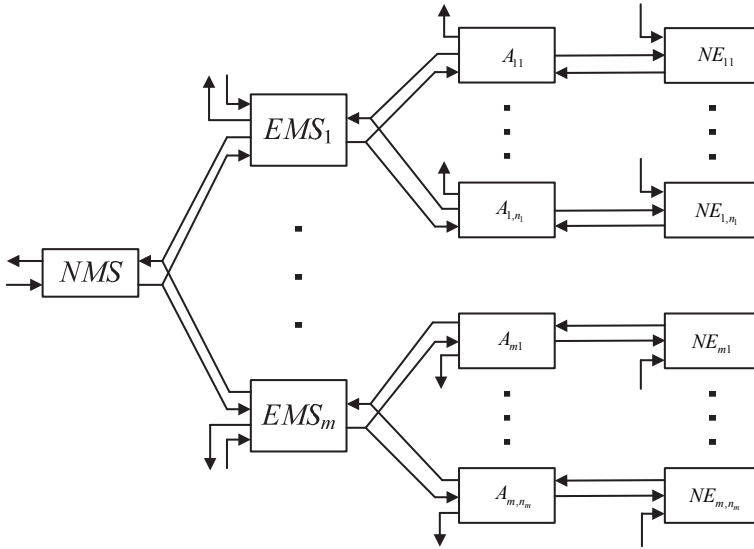


Рис. 1 – Функциональная модель системы управления сетями связи в виде сети массового обслуживания

Fig. 1 – Functional model of telecommunications network management system as a queuing network

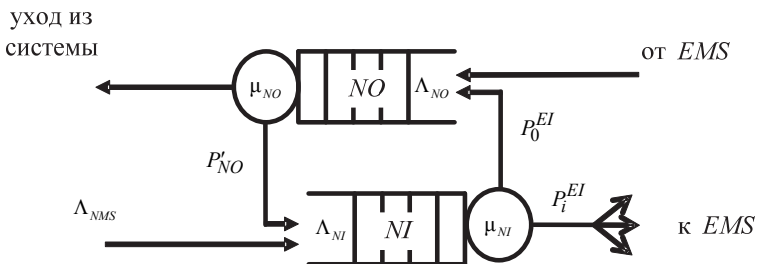


Рис. 2 – Функциональная модель подсистемы NMS

Fig. 2 – Functional model NMS subsystem

В подсистеме EMS_i (рис. 3) процесс функционирования находится под влиянием следующих параметров: 1) Λ_i^{EMS} – интенсивность поступления команд управления (внешние заявки) от персонала РЦУСС, который реализует свои функции в масштабах i -го фрагмента сети связи ($i = \overline{1, m}$); 2) P_{ij}^{AI} – вероятность того, что обслуженная заявка из очереди EI_i отправляется агенту A_{ij}

($j = \overline{1, n_i}$), который относится к сфере управления подсистемы EMS_i , либо (при $j = 0$) остается в контуре EMS_i , т. е. поступает для дальнейшей обработки в очередь EO_i ; 3) вероятности P_i^{ex} и P_i^{EO} , которые для очереди EO_i характеризуют возможные варианты распределения обслуженных заявок, т.е. уход из СУСС или переход в очередь NO подсистемы NMS ; с дополнительной вероятностью $1 - P_i^{EO} - P_i^{ex}$ заявка переходит в очередь EI_i , т. е. замыкается внутри EMS_i .

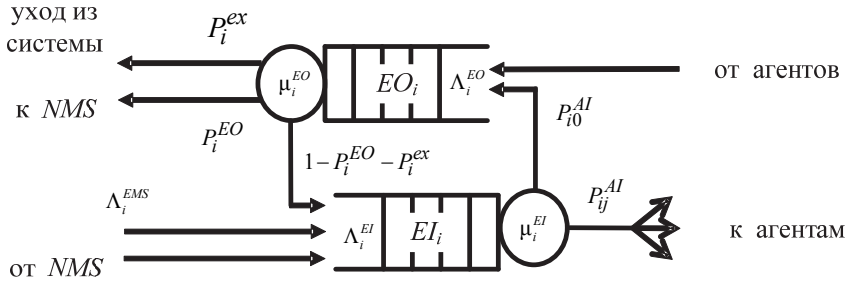


Рис. 3 – Функциональная модель подсистемы EMS

Fig. 3 – Functional model EMS subsystem

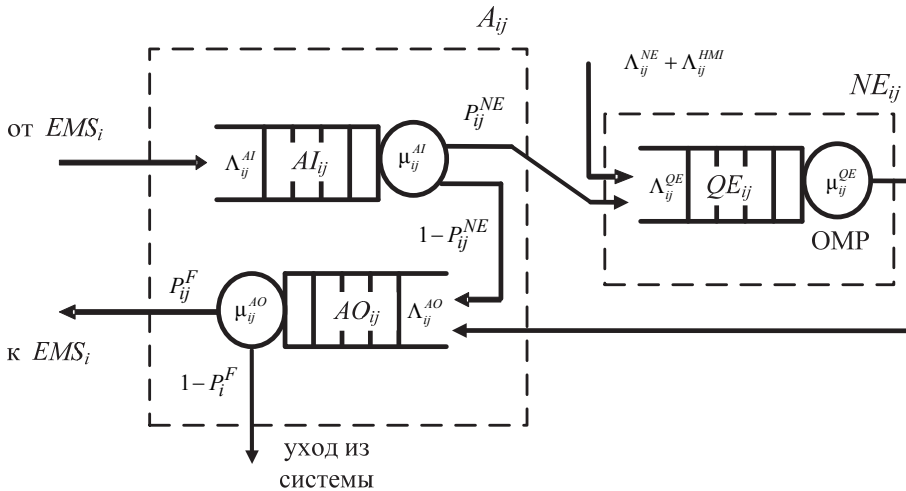


Рис. 4 – Функциональная модель подсистемы «агент – объект управления (A&NE)»

Fig. 4 – Functional model of the subsystem «agent – the control object (A&NE)»

При анализе процесса функционирования подсистемы A&NE (рис. 4) будут приниматься во внимание следующие параметры: 1) λ_{ij}^{NE} – интенсивность потока аварийных сообщений, которые формируются в процессе управления основными функциями сетевого элемента (при обнаружении отклонений от правильного выполнения этих функций); 2) λ_{ij}^{HMI} – интенсивность поступления управляющих директив от внешних источников, которые проводят операции административно-технического управления, получая прямой доступ к оборудованию NE_{ij} через

средства интерфейса «человек-машина» (Human-Machine Interface – *HMI*); 3) P_{ij}^{NE} – вероятность того, что результаты обработки команды (директивы), принятой от соответствующей подсистемы EMS_i , пересылаются сетевому элементу NE_{ij} , т. е. объекту, который непосредственно управляется агентом A_{ij} ; с дополнительной вероятностью $1 - P_{ij}^{NE}$ обработка команды завершается посылкой внутреннего уведомления в выходную очередь (AO_{ij}) этого агента; 4) P_{ij}^F – вероятность передачи подсистеме EMS_i обработанного уведомления с учетом агрегирования (объединения) и фильтрации полученных данных.

3. Построение математической модели СУСС

Первоначально рассмотрим более простой вариант полностью однородной структуры СУСС, когда $n_i = n = \text{const}$ для всех $i = \overline{1, m}$. Кроме того, будем считать эквивалентными значения функциональных параметров для всех однотипных элементов исследуемой системы, т. е. $P_i^{EI} = P_{EI}$, $P_i^{EO} = P_{EO}$, $P_i^{ex} = P_{ex}$, $P_{ij}^{AI} = P_{AI}$, $P_{ij}^{AO} = P_{AO}$, $P_{ij}^F = P_F$, $P_{ij}^{NE} = P_{NE}$, $\Lambda_i^{EMS} = \Lambda_{EMS}$, $\Lambda_{ij}^{NE} + \Lambda_{ij}^{HMI} = \Lambda_{EOM}$ при любых $i = \overline{1, m}$ и $j = \overline{1, n}$. Это несколько идеализирует реальную ситуацию, но помогает построить демонстрационный пример для наглядной иллюстрации потенциальных возможностей рассматриваемой методики анализа качества функционирования СУСС.

В отличие от работ [5–8], где также рассматривалась сеть очередей при моделировании СУСС с архитектурой TMN, в дальнейшем предполагается, что внешние запросы, поступающие в систему, неоднородны по срочности обработки и их важности для задач управления. В этих условиях эффективным механизмом управления процессами распределения ресурсов обработки становятся дисциплины приоритетного обслуживания.

Пусть, в частности, для подсистемы *NMS* все запросы от внешних источников разделяются на R категорий, причем степень важности запроса (его приоритетность) снижается по мере увеличения номера категории ($r = \overline{1, R}$). Распределение запросов по категориям задается вектором $\varepsilon_{NMS} = \left\| \varepsilon_{NMS}^{(r)}; r = \overline{1, R} \right\|$, компоненты которого удовлетворяют равенству $\sum_{r=1}^R \varepsilon_{NMS}^{(r)} = 1$. Тогда для интенсивности поступления запросов r -й категории имеем $\lambda_{NMS}^{(r)} = \varepsilon_{NMS}^{(r)} \Lambda_{NMS}$. Аналогичные формулы можно записать для внешних потоков, которые относятся к другим уровням иерархии исследуемой системы: $\lambda_{EMS}^{(r)} = \varepsilon_{EMS}^{(r)} \Lambda_{EMS}$ и $\lambda_{EOM}^{(r)} = \varepsilon_{EOM}^{(r)} \Lambda_{EOM}$.

Приоритеты внешних команд (запросов) передаются вторичным (внутренним) заявкам, возникающим после завершения первой фазы обслуживания. При этом будем предполагать, что каждая заявка за весь период ее пребывания в СеМО не изменяет свой фиксированный приоритет.

В пределах построенной СеМО (рис. 1) внутренние заявки по разным траекториям перемещаются из одной очереди в другую. Сделаем допущение, что приори-

теты заявок никак не влияют на вероятностные параметры, описывающие характер распределения потоков заявок между узлами СеМО.

Если заданы интенсивности поступления внешних заявок (Λ_{NMS} , Λ_{EMS} и Λ_{EOM}) вместе с их распределением по отдельным приоритетным уровням (т. е. векторы ε_{NMS} , ε_{EMS} и ε_{EOM}), а также известны коэффициенты распределения внутренних заявок (P_{NO} , P_{EI} , P_{EO} , P_{ex} , P_{AI} , P_{NE} и P_F), то несложно записать следующие формулы, которые дают полную интенсивность входного потока r -й категории для каждой очереди в составе рассматриваемой СеМО:

$$\begin{aligned}\lambda_{NI}^{(r)} &= \lambda_{NMS}^{(r)} + P'_{NO}\lambda_{NO}^{(r)}, \\ \lambda_{NO}^{(r)} &= P_0^{EI}\lambda_{NI}^{(r)} + mP_{EO}\lambda_{EO}^{(r)}, \\ \lambda_{EI}^{(r)} &= \lambda_{EMS}^{(r)} + P_{EI}\lambda_{NI}^{(r)} + P_{EMS}\lambda_{EO}^{(r)}, \\ \lambda_{EO}^{(r)} &= P_0^{AI}\lambda_{EI}^{(r)} + nP_F\lambda_{AO}^{(r)}, \\ \lambda_{AI}^{(r)} &= P_{AI}\lambda_{EI}^{(r)}, \\ \lambda_{AO}^{(r)} &= \lambda_{QE}^{(r)} + P'_{NE}\lambda_{AI}^{(r)}, \\ \lambda_{QE}^{(r)} &= \lambda_{EOM}^{(r)} + P_{NE}\lambda_{AI}^{(r)},\end{aligned}$$

где $P'_{NE} = 1 - P_{NE}$, $P_{EMS} = 1 - P_{EO} - P_{ex}$.

При фиксированном r ($r = \overline{1, R}$) все эти равенства, которые выражают условия глобального равновесия для СеМО в целом, образуют систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно неизвестных $\lambda_{NI}^{(r)}$, $\lambda_{NO}^{(r)}$, $\lambda_{EI}^{(r)}$, $\lambda_{EO}^{(r)}$, $\lambda_{AI}^{(r)}$, $\lambda_{AO}^{(r)}$, $\lambda_{QE}^{(r)}$.

4. Локальные характеристики процесса функционирования СУСС

Построенная модель процесса функционирования СУСС позволяет перейти к рассмотрению элементарных однолинейных СМО, общее число которых легко определить суммированием по всем уровням иерархии на рис. 1: $N = 2 + 2m + m(2n + n)$. Анализ этих СМО осуществляется независимо, что соответствует хорошо известному принципу декомпозиции [9, 10] при исследовании сложных систем, функционирование которых описывается сетью очередей.

К примеру, в случае дисциплины обслуживания с относительными приоритетами среднее время пребывания заявки r -й категории в k -м элементе СеМО ($k \in \{NI, NO, EI, EO, AI, AO, QE\}$) равно [11]

$$w_k^{(r)} = \frac{A_k^{(R)}}{\mu_k(1 - A_k^{(r-1)})(1 - A_k^{(r)})} + \frac{1}{\mu_k},$$

где μ_k – интенсивность обслуживания для рассматриваемого элемента;

$A_k^{(r)} = \sum_{i=1}^r \lambda_k^{(i)} / \mu_k$ – суммарный коэффициент загрузки k -й СМО потоками заявок с приоритетами не ниже, чем r ; $A_k^{(0)} = 0$.

Важно отметить, что локальные характеристики элементов СУСС могут оцениваться с применением многочисленных теоретических результатов исследования однолинейных СМО при разнообразных дисциплинах приоритетного обслуживания. Благодаря этому открываются широкие перспективы для многовариантного выбора наиболее эффективных алгоритмов обслуживания неоднородных потоков заявок.

5. Оценка показателей качества функционирования СУСС

Скорость реакции (латентность) исследуемой СУСС будем оценивать средней длительностью интервала времени от момента ввода в систему внешнего запроса (или команды управления) до момента получения оператором ответного сообщения (или уведомления о выполнении команды). Применительно к построенной сети очередей это означает необходимость вычисления среднего времени пребывания заявки в пределах СеМО. В зависимости от выбранных источников заявок можно рассматривать общий поток внешних заявок либо только внешние заявки, относящиеся к определенному уровню СУСС.

Суммарная интенсивность общего потока внешних заявок r -й категории равна $\Lambda_{\text{общ}}^{(r)} = \lambda_{NMS}^{(r)} + m(\lambda_{EMS}^{(r)} + n\lambda_{EOM}^{(r)})$. Для произвольной заявки этого потока среднее значение общего времени ее присутствия в пределах всей системы (включая время непосредственной обработки заявки соответствующими устройствами) можно найти по формуле Литтла:

$$W_{\text{общ}}^{(r)} = \frac{L_{\text{общ}}^{(r)}}{\Lambda_{\text{общ}}^{(r)}},$$

где $L_{\text{общ}}^{(r)} = \sum_k \lambda_k^{(r)} w_k^{(r)}$ – среднее значение общего числа рассматриваемых заявок, находящихся в системе в произвольный момент времени.

Если сосредоточить внимание только на внешних заявках, поступающих через ГЦУСС (т. е. во входную очередь NI подсистемы NMS), то с учетом разных маршрутов (траекторий) движения этих заявок по отдельным фазам обслуживания можем получить:

$$W_{NMS}^{(r)} = w_{NI}^{(r)} + w_{NO}^{(r)} + (1 - P_0^{EI}) \left[w_{EI}^{(r)} + w_{EO}^{(r)} + (1 - P_0^{AI}) (w_{AI}^{(r)} + w_{AO}^{(r)} + P_{NE} w_{OMP}^{(r)}) \right].$$

6. Результаты численных расчетов

Контрольные расчеты для случая однородной структуры СУСС проведены при следующих исходных данных [5–8]: $m = n = 5$; $P_{NO} = 0,99$; $P_0^{EI} = P_0^{AI} = 0,1$; $P_{EI} = (1 - P_0^{EI}) / m = 0,18$; $P_{EO} = P_{NE} = 0,5$; $P_{ex} = 0,49$; $P_{AI} = (1 - P_0^{AI}) / n = 0,18$;

$P_F = 0,9$; $\Lambda_{EMS} = 0,085$; $\Lambda_{EOM} = 0,21$; $\mu_{NI} = \mu_{NO} = \mu_{EI} = \mu_{EO} = 2,85$; $\mu_{AI} = 4,1$; $\mu_{AO} = 2,15$; $\mu_{OMP} = 7,3$.

Предполагалось наличие трех категорий важности ($R=3$) для внешних команд (запросов): экстренные ($r=1$), повышенной срочности ($r=2$) и обычные, т. е. без приоритета ($r=3$). При этом

$$\varepsilon_{NMS} = \varepsilon_{EMS} = \|0,2; 0,6; 0,2\|, \quad \varepsilon_{EOM} = \|0,1; 0,6; 0,3\|.$$

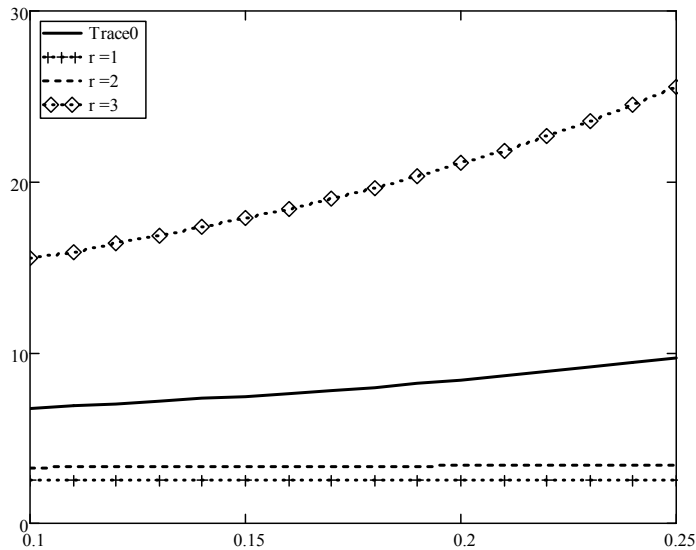


Рис. 5 – Зависимости $W_{NMS}^{(r)} = f(\Lambda_{NMS})$

Fig. 5 – Dependencies $W_{NMS}^{(r)} = f(\Lambda_{NMS})$

По графикам, которые представлены на рис. 5, можно проследить, каким образом значения $W_{NMS}^{(r)}$, оценивающие среднее время реакции СУСС по отношению к командам разных приоритетов, изменяются под влиянием суммарной интенсивности поступления этих команд из главного центра управления сетью (Λ_{NMS}).

При оценке эффекта от введения дисциплины приоритетного обслуживания базовым вариантом служит сплошная линия Trace0, полученная на основе результатов из [7]. Как показывает сравнение с этой кривой, время реакции СУСС для внешних запросов, обладающих приоритетами ($r < 3$), существенно уменьшается и сохраняется практически неизменным в рассматриваемом диапазоне значений Λ_{NMS} . Естественно, что это происходит за счет увеличения времени ответа на обычные запросы, которые не имеют приоритета.

Таким образом, на основании проведенных расчетов можно констатировать, что при разной степени важности команд управления, относящихся к задачам технического обслуживания и эксплуатации сетей связи, приоритетная стратегия выделения ресурсов обработки, имеющихся в составе элементов СУСС, способна более гибко учесть отличия в требованиях к допустимому времени реакции на эти команды.

Заключение

Современные системы управления, которые предназначены для эксплуатационной поддержки телекоммуникационных сетей, характеризуются сложной структурой с несколькими уровнями иерархии и требуют рационального выбора большого числа параметров, обеспечивающих высокое качество функционирования и эффективную работу этих систем. Функциональность СУСС тесно связана с диалоговым режимом в масштабе реального времени, поэтому максимальная скорость реакции (особенно при нештатных ситуациях на объекте управления) играет ключевую роль для организации процессов формирования управляющих воздействий. Зная составляющие времени реакции, можно оценить производительность отдельных элементов СУСС, выявить узкие места и, в случае необходимости, выполнить модернизацию системы для повышения ее общей производительности.

В методологическом базисе создания подобных организационно-технических систем существенное место занимают теоретические результаты и инженерные методы, которые в процессе проектирования позволяют прогнозировать характеристики работы СУСС при изменении технических и программных средств, разрабатывать конкретные требования к реализации целостной системы и ее составных частей для реальных сетей операторов связи. Рассмотренная в статье математическая модель, которая в полной мере отражает структурно-функциональную архитектуру классической TMN, и полученные аналитические соотношения дают возможность провести быструю оценку параметров эффективности эксплуатационных процессов для альтернативных вариантов построения типовых систем управления, поступающих на телекоммуникационный рынок.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гребешков А.Ю.** Стандарты и технологии управления сетями связи. – М.: Эко-Трендз, 2003. – 288 с.
2. **Дымарский Я.С., Крутякова Н.П., Яновский Г.Г.** Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи. – М.: Мобильные коммуникации, 2003. – 384 с.
3. **Костин А.А.** Модель системы интегрированного управления телекоммуникационными сетями и услугами // *Электросвязь*. – 2002. – № 10. – С. 22–26.
4. **Мочалов В.П.** Теоретические основы разработки и анализ вероятностно-временных характеристик распределенных систем управления телекоммуникационными сетями и услугами. – М.: Физматлит, 2006. – 365 с.
5. **Woo W.-D., Hwang H.-S., Yoon B.-N.** Throughput evaluation of TMN EMS for ATM switch // *ITS'98 Proceedings: SBT/IEEE International Telecommunications Symposium*. – Piscataway: IEEE, 1998. – Vol. 2. – P. 566–570. – doi: 10.1109/ITS.1998.718457.
6. Implementation and performance analysis of a TMN system for public ATM networks / J.Y. Lee, C.J. Hwang, G.H. Lee, W.D. Woo, B.-N. Yoon // *Computers & Industrial Engineering*. – 1998. – Vol. 35, iss. 1/2. – P. 275–278. – doi: 10.1016/S0360-8352(98)00056-4.
7. A performance analysis of TMN systems using models of networks of queues, Jackson's theorem, and simulation / Y.H. Hwang, S.W. Chung, G.-H. Lee, Y.I. Kim // *ETRI Journal*. – 2002. – Vol. 24, N 5. – P. 381–390. – doi: 0.4218/etrij.02.0102.0006.
8. Design of TMN systems using interrupted arrival Poisson process and simulation: a case study / Y.H. Hwang, G.I. Lee, G.H. Lee, S.W. Chung // *Simulation Series*. – 2003. – Vol. 35, N 4. – P. 675–679.
9. **Kühn P.** Analysis of complex queuing networks by decomposition // *Proceedings of the 8th International Teletraffic Congress, Melbourne, November 1976*. – Melbourne, 1976. – Vol. 1. – P. 236/1–236/8.

10. **Kuehn P.** Approximate analysis of general queuing networks by decomposition // IEEE Transactions on Communications. – 1979. – Vol. 27, iss. 1. – P. 113–126. – doi: 10.1109/TCOM.1979.1094270.
11. **Шнепс М.А.** Системы распределения информации. Методы расчета: справочное пособие. – М.: Связь, 1979. – 344 с.

ON ANALYSIS OF PRIORITY-BASED SERVICE DISCIPLINE IN MULTILEVEL TELECOM NETWORK MANAGEMENT SYSTEM

Meikshan V.I.

*Siberian States University of Telecommunications and Information Sciences,
Novosibirsk, Russia*

The network of queues is considered as a theoretical instrument to analyze a hierarchical management system for telecommunication network. The structure of investigated system fully corresponds to the concept of Telecommunications Management Network (TMN) which has now become widespread among integrated management systems for large-scale telecommunication networks. Proposed approach includes stages of functional model construction for the system under investigation and its mathematical description. These stages are followed by estimation of mean response time which relates to the reaction on external management commands associated with network administration, maintenance and operation activities. At that point several categories of importance (relative priorities) for management commands are taken into consideration. For model definition the following input parameters are introduced to be considered under management system analysis: arrival intensities of external requests; distribution coefficients for internal demand flows circulating between individual elements of management system (both within separate level of the system and between adjacent levels); service rates for separate queues. On the base of global equilibrium condition the system of linear algebraic equations is obtained which allows finding total intensity of input flow for each queue as part of queuing network. Local performance measures to characterize the working processes of these queues are calculated in accordance with the principle of queuing network decomposition. With consideration of these characteristics an estimation of final performance metrics for management system is fulfilled in relation to flows of external requests. To illustrate the opportunities of the proposed approach, results of numerical calculations are presented. Analysis of these results demonstrate that priority discipline for distribution of processing resources being held by elements of management system more flexible takes into account significant distinction in admissible response time for management operations of different categories.

Keywords: telecommunication networks, management system, queuing theory, priorities, mean response time.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-73-83

REFERENCES

1. Grebeshkov A.Yu. *Standarty i tekhnologii upravleniya setyami svyazi* [Standards and technologies of telecommunications networks management]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2003. 288 p.
2. Dymarskii Ya.S., Krutyakova N.P., Yanovskii G.G. *Upravlenie setyami svyazi: printsipy, protokoly, prikladnye zadachi* [Telecommunications networks management: principles, protocols, applied problems]. Moscow, Mobil'nye kommunikatsii Publ., 2003. 384 p.
3. Kostin A.A. *Model' sistemy integrirovannogo upravleniya telekommunikatsionnymi setyami i uslugami* [Model of integrated management systems for telecommunications networks and services]. *Elektrosvyaz' – Telecommunications and Radio Engineering*, 2002, no. 10, pp. 22–26. (In Russian)
4. Mochalov V.P. *Teoreticheskie osnovy razrabotki i analiz veroyatnostno-vremennykh kharakteristik raspredelennykh sistem upravleniya telekommunikatsionnymi setyami i uslugami* [Theoretical fundamentals of development and performance analysis of distributed management systems for telecommunications networks and services]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 365 p.

5. Woo W.-D., Hwang H.-S., Yoon B.-N. Throughput evaluation of TMN EMS for ATM switch. *ITS'98 Proceedings: SBT/IEEE International Telecommunications Symposium*, 1998, vol. 2, pp. 566–570. doi: 10.1109/ITS.1998.718457
6. Lee J.Y., Hwang C.J., Lee G.H., Woo W.D., Yoon B.-N. Implementation and performance analysis of a TMN system for public ATM networks. *Computers & Industrial Engineering*, 1998, vol. 35, iss. 1–2, pp. 275–278. doi: 10.1016/S0360-8352(98)00056-4
7. Hwang Y.H., Chung S.W., Lee G.-H., Kim Y.I. A performance analysis of TMN systems using models of networks of queues, Jackson's theorem, and simulation. *ETRI Journal*, 2002, vol. 24, no. 5, pp. 381–390. doi: 0.4218/etrij.02.0102.0006
8. Hwang Y.H., Lee G.I., Lee G.H., Chung S.W. Design of TMN systems using interrupted arrival Poisson process and simulation: a case study. *Simulation Series*, 2003, vol. 35, no. 4, pp. 675–679.
9. Kühn P. Analysis of complex queuing networks by decomposition. *Proceedings of the 8th International Teletraffic Congress*, Melbourne, November 1976, vol. 1, pp. 236/1–236/8.
10. Kuehn P. Approximate analysis of general queuing networks by decomposition. *IEEE Transactions on Communications*, 1979, vol. 27, no. 1, pp. 113–126. doi: 10.1109/TCOM.1979.1094270
11. Shneps M.A. *Sistemy raspredeleniya informatsii. Metody rascheta* [Information distribution systems. Methods of calculation]. Moscow, Svyaz' Publ., 1979. 344 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



Мейкшан Владимир Иванович – родился в 1949 г., д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматической электросвязи Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Область научных интересов: качество функционирования и надежность мультисервисных сетей связи, распределенные информационные системы, управление сетями связи. Автор и соавтор более 170 научных и учебно-методических работ. (Адрес: 630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86. E-mail: meikshanvi@gmail.com).

Meikshan Vladimir Ivanovich (b. 1949) – Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Professor of the Automatic Electrical Communication Department in the Siberian States University of Telecommunications and Information Sciences. His research interests are currently focused on dependability and performance of multiservice networks, distributed information systems and telecommunication networks management. He is author and co-author of over 170 scientific and educational publications. (Address: 86, Kirova St., Novosibirsk, 630102, Russia. E-mail: meikshanvi@gmail.com).

Статья поступила 03 сентября 2015 г.

Received September 03, 2015

To Reference:

Meikshan V.I. K voprosu analiza distsipliny prioritetnogo obsluzhivaniya pri mnogourovnevnom upravlenii setyami svyazi [On analysis of priority-based service discipline in multilevel telecom network management system]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 1 (30), pp. 73–83. doi: 10.17212/1727-2769-2016-1-73-83

УДК 621.311

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК МЕЛКИХ НЕЛИНЕЙНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА РАБОТУ СЕТИ ДО 1000 В

В.Я. Ольховский, Т.В. Мятеж, С.Ю. Наяксов

Новосибирский государственный технический университет

В статье приводится анализ особенностей режимов работы некоторых мелких потребителей, таких как зарядные устройства и блоки электропитания бытовой техники (телевизоры, компьютеры, стиральные машины и др.), единичная потребляемая мощность которых невелика. Среди нелинейных нагрузок наиболее распространенными являются вентильные преобразователи и различные регулирующие устройства, электропитание которых производится на напряжении 380/220 В. Особый вклад в искажение синусоидальности кривой напряжения вносит осветительная нагрузка. При увеличении числа устройств возникает потребность минимизации высших гармоник токов и напряжений в таких сетях. Поэтому целью данной работы являются исследование и анализ несинусоидальности токов, потребляемых мелкими нелинейными нагрузками, для разработки мер по улучшению качества электроснабжения потребителя.

Ключевые слова: частотно управляемый электрический привод, широтно-импульсная модуляция, высшие гармоники, электроснабжение

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-84-97

1. Введение

Одной из важных особенностей современного технического прогресса в электроэнергетике является постоянное возрастание количества и мощности так называемых нелинейных нагрузок. Наличие таких нагрузок в электрических сетях приводит к появлению высших гармоник напряжения, которые вызывают целый ряд негативных явлений (потери напряжения, старение изоляции линий электропередачи, перегрев магнитопровода и т. д.) в электрооборудовании этих сетей. Поэтому важно научиться определять ущерб, вызываемый высшими гармониками в сети потребителя. А также разработать эффективные методы борьбы с высшими гармониками, которые бы позволили достичь практически синусоидальной формы кривой напряжения.

Среди нелинейных нагрузок наиболее распространенными являются вентильные преобразователи и различные регулирующие устройства, электропитание которых производится на напряжении 380/220 В (различные зарядные устройства и блоки электропитания бытовой техники). Несмотря на то что единичная потребляемая мощность таких устройств мала, при одновременном их использовании возникает необходимость минимизировать высшие гармоники токов и напряжений в указанных сетях [1]. В качестве примера такой ситуации можно привести строительство гостиницы «Burj Al Arab» в Дубае. Эта гостиница была оснащена таким большим количеством электроприемников, являющихся нелинейными нагрузками, что оказалось невозможным нормальная эксплуатация системы ее электроснабжения. При сдаче в эксплуатацию этой гостиницы были реализованы

специальные мероприятия по уменьшению уровня высших гармоник токов в низковольтной сети (установка ФКУ и активных фильтров).

В связи с этим возникает вопрос о характеристиках многочисленных мелких нелинейных электроприемников, что и является задачей данной работы, в которой произведен анализ высших гармоник токов, потребляемых современными массовыми нелинейными электроприемниками [2, 3]. Количество таких электроприемников велико и имеет тенденцию в современных условиях постоянно возрастать. Такое возрастание характерно для любых систем электроснабжения: промышленных, городских, сельских и др. Поэтому специалисты, занятые проектированием различных систем электроснабжения, проявляют все больший интерес к несинусоидальности токов, потребляемых мелкими нелинейными нагрузками.

2. Анализ нелинейных нагрузок потребителя

В качестве примера нелинейных нагрузок небольшой мощности рассмотрены частотно регулируемые асинхронные приводы ACS150 и ACS550 (одна из последних моделей) фирмы АББ мощностью 1,5 кВт. Частотно регулируемые преобразователи (ЧРП) этих приводов сконструированы таким образом, что ток в обмотке статора асинхронного двигателя (рис. 1) является практически синусоидальным, хотя на его осциллограмме просматриваются импульсы напряжения, обусловленные работой широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Синусоидальность тока в обмотке статора асинхронного двигателя важна с точки зрения минимизации потерь в двигателе.

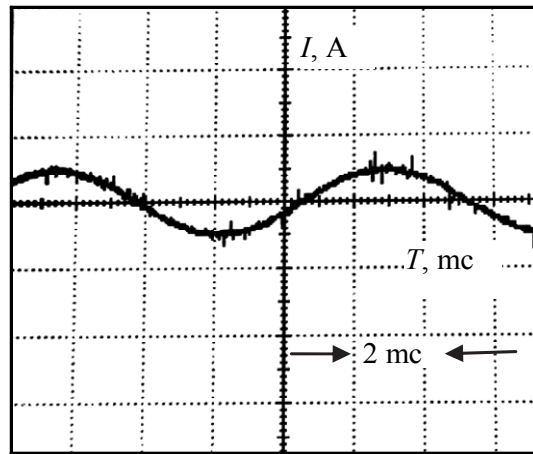


Рис. 1 – Осциллограмма тока обмотки статора асинхронного двигателя ЧРП

Fig. 1 – The adjustable-frequency electric drives stator winding current oscillogram

Входным звеном ЧРП является неуправляемый выпрямитель. Осциллограмма тока, потребляемого ЧРП ACS550 из сети, приведена на рис. 2. Гребенка на рисунке вызвана работой ШИМ. Этот ток отличается значительной несинусоидальностью и может создавать кондуктивные электрические помехи в сети электропитания [4].

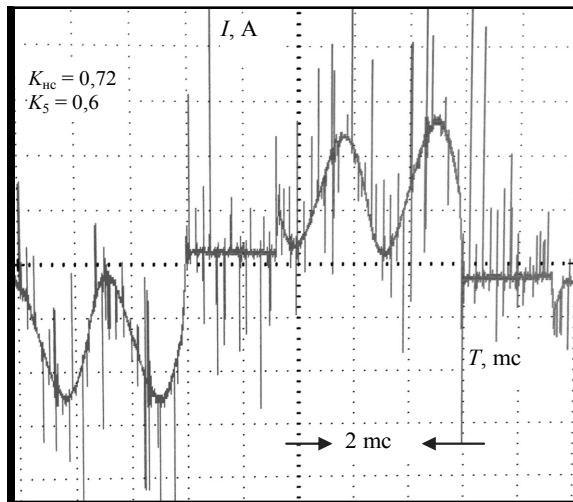


Рис. 2 – Осциллограмма сетевого тока ЧПП ACS550

Fig. 2 – The adjustable-frequency electric drives ACS 550 circuit current oscillogram

На рис. 3 показан спектр этого тока. Для сравнения на этом же рисунке приведен спектр тока идеального выпрямителя, для которого в цепи выпрямленного тока имеется большая индуктивность.

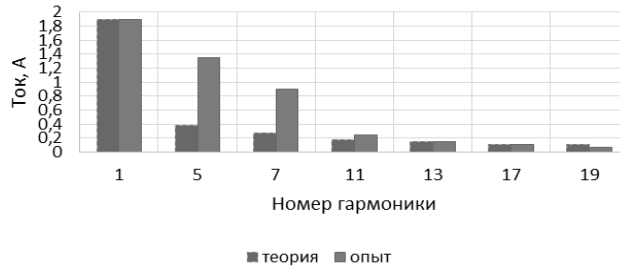


Рис.3 – Спектральный состав сетевого тока для идеального выпрямителя и для ACS550

Fig.3 – The circuit current spectral distribution for ideal rectifier (dotted line) and ACS550 (solid line)

Как известно, идеальный неуправляемый выпрямитель с бесконечно большой индуктивностью в цепи выпрямленного тока при синусоидальном напряжении электропитания потребляет несинусоидальный ток, имеющий следующие гармоники:

$$n = km \pm 1; \quad I_n = \frac{I_1}{n}, \quad (1)$$

где n – номер гармоники тока; k – натуральный ряд чисел (1, 2, 3, ...); m – число фаз выпрямителя; I_n – действующее значение тока n -й гармоники.

Как видно из рис. 2, уровень высших гармоник тока потребляемого ЧПП из сети довольно высокий. Коэффициент несинусоидальности этого тока, равный

отношению суммарного действующего значения тока всех высших гармоник к действующему значению тока первой гармоники равен 0,72. Так как входные выпрямители этих ЧРП трехфазные, в их сетевом токе отсутствует третья гармоника. Пятая гармоника ЧРП ACS150 составляет значительную величину (1,1 первой гармоники).

Важными особенностями рассмотренных приводов является практически полное отсутствие потребления реактивной мощности и большая несинусоидальность потребляемого из сети тока. На рис. 4 приведена осциллограмма тока, потребляемого из сети ЧРП ACS150 при номинальной нагрузке двигателя. Коэффициент несинусоидальности этого тока достигает величины 1,5, а наибольшая пятая гармоника – 1,1 от первой. На этой осциллограмме явно проявляется работа ШИМ, что свидетельствует о недостаточной фильтрации помех при проведении измерений [5, 6].

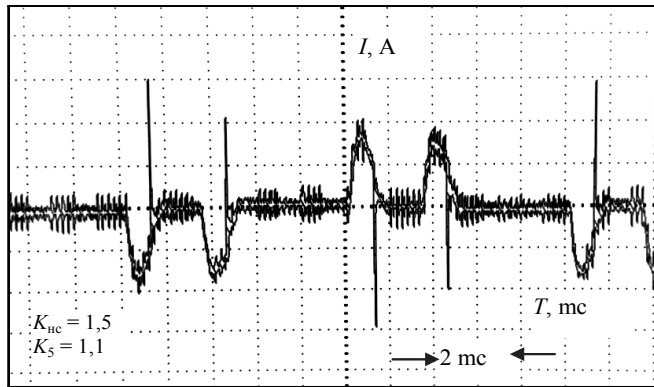


Рис. 4 – Осциллограмма сетевого тока ЧРП ACS150

Fig. 4 – The adjustable-frequency electric ACS150 drives circuit current oscillogram

Устройство ACS150 намного проще по конструкции и дешевле ACS550, чем, видимо, и объясняется большая разница в несинусоидальности сетевых токов.

В табл.1 приведены результаты измерений параметров привода ACS550 для номинальной скорости вращения и для пяти различных значений коэффициента загрузки (от 0,2 до полной номинальной мощности). Для измерений использовалось устройство JANITZA UMG103. При номинальной мощности двигателя, равной 1,5 кВт и номинальной скорости вращения, равной 695 об/мин, номинальный момент двигателя составляет 20 Нм. Ток, потребляемый двигателем из сети в этом режиме (3,46 А) за счет отсутствия реактивной составляющей, что обусловлено работой ЧРП, оказывается меньше тока фазы обмотки статора двигателя (4,4 А). Это особенность устраняет «регулирующий эффект нагрузки» и тем самым способствует устранению проблем, вызываемых реактивной мощностью асинхронных двигателей, работающих без ЧРП [4].

Большая несинусоидальность тока, потребляемого из сети, негативно проявляется в основном в увеличении потерь энергии в элементах сети 380/220 В и в понижительных трансформаторах 10/0,4 кВ. Это увеличение потерь пока незначительно, но со временем при увеличении мощности и количества мелких нелинейных нагрузок значимость этой проблемы будет возрастать [7, 8].

При возрастании нагрузки привода ACS550 коэффициент несинусоидальности тока $K_{нс}$ убывает от 1,2 до 0,72.

Если ограничиться гармоникой $n = 17$ и учесть, что отсутствуют четные гармоники в выражении (1), то ток, потребляемый из сети, будет равен

$$I_c = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + \dots + I_{17}^2}. \quad (2)$$

Для режима номинальной нагрузки и номинальной скорости вращения (5-й столбец в таблице) величина тока, потребляемого из сети:

$$I_c = \sqrt{2,81^2 + 0,21^2 + 1,62^2 + \dots + 0,15^2} = \sqrt{2,81^2 + 2,02^2} = 3,46 \text{ А},$$

где $I_1 = 2,81 \text{ А}$ – действующее значение тока первой гармоники;

$I_{\text{вг}} = \sqrt{0,21^2 + 1,62^2 + 1,13^2 + 0,08^2 + 0,25^2 + 0,21^2 + 0,04^2 + 0,15^2} = 2,02 \text{ А}$ – действующее значение токов всех высших гармоник

Значения контролируемых параметров при $n = 695 \text{ об/мин}$ и $\omega = 72,7 \text{ 1/с}$ для ЧРП ACS550

Номер опыта	Параметры	1	2	3	4	5
На зажимах двигателя	M , Н·м	2	6	10	15	20
	I_1 , А	2,8	2,9	3,3	3,8	4,4
	P , кВт	0,1	0,4	0,7	1,1	1,5
Панель управления ЧРП	f , Гц	46,5	46,9	47,4	47,9	48,5
Ввод электропитания ЧРП 380 В	I_c , А	0,68	1,36	2,1	2,71	3,46
	P_c , Вт	306,12	613,16	1002	1445	1954
	S_c , ВА	474,73	881,57	1400	1900	2435
	$\cos \varphi$	0,997	0,995	0,994	0,993	0,991
Гармоники тока, потребляемые ЧРП из сети	I_1 , А	0,43	0,87	1,49	2,08	2,81
	I_3 , А	0,03	0,05	0,03	0,11	0,21
	I_5 , А	0,35	0,67	1,1	1,36	1,62
	I_7 , А	0,31	0,55	0,83	1,01	1,13
	I_9 , А	0,02	0,04	0,03	0,06	0,08
	I_{11} , А	0,16	0,22	0,29	0,23	0,25
	I_{13} , А	0,13	0,14	0,16	0,16	0,21
	I_{15} , А	0,02	0,02	0	0,03	0,04
I_{17} , А	0,04	0,06	0,1	0,1	0,15	
Коэффициент несинусоидальности	$K_{\text{нс}}$	1,2	1,05	0,95	0,83	0,72

На рис. 5 приведена осциллограмма тока бытового светильника с двумя встроенными энергосберегающими лампами мощностью по 11 Вт. Вид несинусоидальности этого тока обусловлен конструкцией пускорегулирующего аппарата, встроенного в энергосберегающую лампу. Гармоники, кратные трем, в этом случае суммируются в нулевом проводе.

На рис. 5–13 приведены осциллограммы токов некоторых мелких однофазных нелинейных нагрузок: энергосберегающих ламп, телевизоров и компьютеров. Импульсные блоки питания этих нагрузок потребляют из сети токи, отличающиеся высоким содержанием высших гармоник. Так, например, в токе энергосберегающих ламп высшие гармоники составляют 1,1, а третья гармоника – 0,76 от тока первой гармоники. Высшие гармоники определялись разложением в ряд Фурье полученных осциллограмм с помощью программы GARM I.

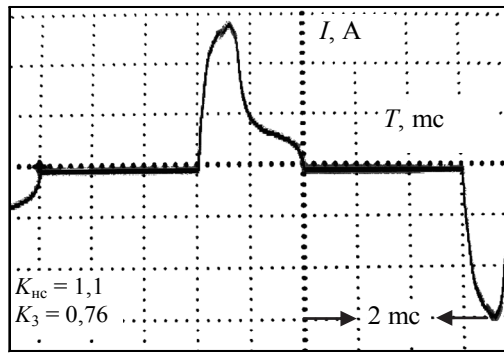


Рис. 5 – Осциллограмма тока, потребляемого из сети светильником с двумя энергосберегающими лампами мощностью 11 Вт при номинальном напряжении

Fig. 5 – The popular lamp with two 11 W energy-saving lamps current oscillogram is conducted at nominal voltage

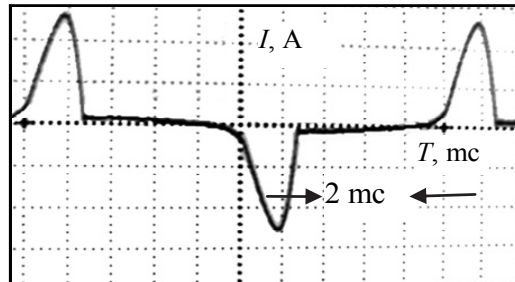


Рис. 6 – Осциллограмма тока, потребляемого стиральной машиной LGDD в режиме отжима

Fig. 6 – The oscillogram of current consumed by LGDD washing machine in a spinning mode

В стиральных машинах, для вращения барабана, в качестве тягового устройства применяются электродвигатели. Как известно, в электродвигателе электрическая энергия преобразуется в механическую. Напрямую к валу барабана крепится шкив – фрикционное колесо с ободом или канавкой, которое передает движение приводному ремню. Традиционно, в стиральных машинах вращение от шкива электродвигателя передается через ремень к шкиву барабана, поэтому этот тип передачи получил название ременный. Подавляющее большинство стиральных машин, продаваемых в России, имеют ременный привод барабана.

С развитием электронных технологий и усовершенствованием конструкции бытовых приборов в ряде стиральных машин стал применяться так называемый прямой привод барабана (Direct Drive – с англ. прямой привод). Двигатели в таких стиральных машинах имеют иную конструкцию и место расположения, а ротор (вращающаяся часть) двигателя стал крепиться напрямую к валу барабана. Благодаря прямому приводу удалось исключить из конструкции ремень, шкив и щетки, но электронная система управления двигателями с прямым приводом стала значительно сложнее. Сам по себе двигатель в таких машинках отличается высокой надежностью.

Гар	Амплитуда	Фаза в градусах	$I_0 = 0.000000$ - постоянная составляя.
1	4.629647	56.105118	Вид ЗАПИСИ: $Y(x) = I_0 + A_1 \sin(x + \Phi_1) + A_2 \sin(2x + \Phi_2) + A_3 \sin(3x + \Phi_3) + \dots + A_n \sin(Nx + \Phi_n)$ где: I_0 - постоянная составляющая; A_1, A_2, \dots, A_n - амплитуды гармоник от 1 до N; $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ - фазы гармоник в радианах; ω (сингл) - частота первой гармоники, рад/с; N - число исследуемых гармоник; x - текущая точка. ЧИСЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИВОЙ: Действит. значение: $I_d = 4.5354$ Среднее значение: $I_{cp} = 2.5400$ Коэфф. несинусоид.: $K_{нс} = 0.9586$
2	0.000000	0.000000	
3	3.228379	9.281765	
4	0.000000	0.000000	
5	2.457105	-45.093323	
6	0.000001	0.000000	
7	1.443290	-107.396919	
8	0.000001	0.000000	
9	0.720237	170.584503	
10	0.000001	0.000000	
11	0.590988	83.944603	
12	0.000001	0.000000	
13	0.416725	-5.763505	
14	0.000001	0.000000	
15	0.235447	-68.951241	
16	0.000000	0.000000	
17	0.168532	165.284988	
18	0.000001	0.000000	
19	0.161898	84.135857	

Для ПРОДОЛЖЕНИЯ нажмите <Enter>

а

Гармоника	Амплитуда	Фаза в градусах
1	4,629647	56,105118
2	0,000000	0,000000
3	3,228379	9,281765
4	0,000000	0,000000
5	2,457105	-45,093323
6	0,000001	0,000000
7	1,443290	-107,396919
8	0,000001	0,000000
9	0,720237	170,584503
10	0,000001	0,000000
11	0,590988	83,944603
12	0,000001	0,000000
13	0,416725	-5,763505
14	0,000001	0,000000
15	0,235447	-68,951241
16	0,000000	0,000000
17	0,168532	165,284988
18	0,000001	0,000000
19	0,161898	84,135857

б

Рис.7 – Результаты расчета кривой тока, потребляемого стиральной машиной LG DD:

а – скриншот расчета в программе GARM I; б – результаты расчета кривой тока, потребляемого стиральной машиной LG DD, в программе GARM I

Fig.7 – The resultant calculations of current curve consumed by LG DD washing machine:

а – screenshot of the piece of programme (GARM I programme used; б – the resultant calculations of the current curve consumed by LG DD washing machine in GARM I

Компания LG, одна из первых выпустила стиральную машину с прямым приводом барабана, получившую название серии Direct Drive (DD). Сегодня прямой привод применяется в ряде стиральных машин марки Samsung (Самсунг), Whirlpool (Вирпул), Haier (Хаер).

Объектом исследования является стиральная машина LG Direct Drive. Так как в различных режимах работы стиральной машины форма тока не меняется, то в данной работе осциллограмма тока была снята в режиме отжима при максимальных оборотах 800 об/мин.

Нелинейным электроприемником также является ЖК телевизор марки Philips, установленный в аудитории П-334 кафедры «Системы электроснабжения предприятий» факультета энергетики НГТУ. Кривая тока, потребляемого ЖК, и полученные результаты измерений приведены на рис. 10 и рис. 11 соответственно.

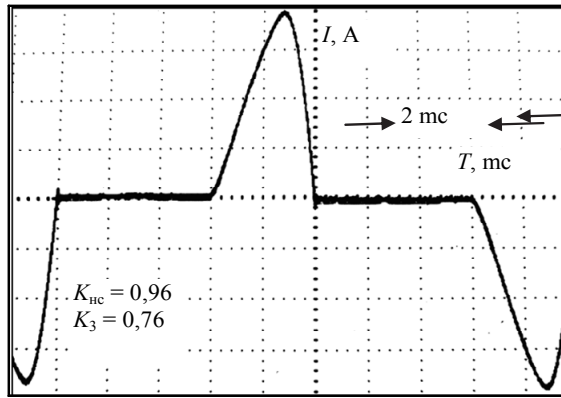


Рис. 8 – Ток, потребляемый жидкокристаллическим телевизором SHARPAGUOS

Fig. 8 – The liquid crystal TV SHARPAGUOS 's current oscillogram

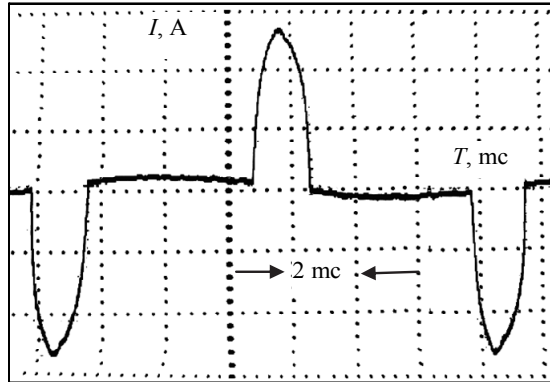


Рис. 9 – Ток, потребляемый телевизором MYSTERY

Fig. 9 – The TV MYSTERY 's current oscillogram

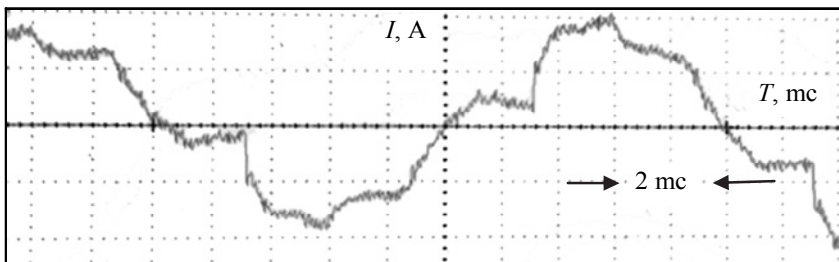


Рис. 10 – Осциллограмма тока, потребляемого ЖК Philips

Fig. 10 – The oscillogramm of current consumed by TV Philips in a spinning mode

Гар	Амплитуда	Фаза в градусах	А ₀ = 0.000000-постоянная составл.
1	8.339324	-10.081004	
2	0.000000	0.000000	
3	0.995858	131.243652	
4	0.000001	146.347519	
5	1.224389	46.436996	
6	0.000001	-125.557869	
7	0.245075	-83.885185	
8	0.000001	0.000000	
9	0.718847	-153.206879	
10	0.000000	0.000000	
11	0.123947	102.921379	
12	0.000003	65.205551	
13	0.175635	-155.809204	
14	0.000003	64.827980	
15	0.008365	-59.555576	
16	0.000001	0.000000	
17	0.213676	96.650009	
18	0.000003	109.677704	
19	0.181360	85.769272	

Вид ЗАПИСИ:
 $Y(x) = A_0 + A_1 * \sin(x + \Phi_1) + A_2 * \sin(x + \Phi_2) + \dots + A_n * \sin(x + \Phi_n)$
 где:
 A_0 - постоянная составляющая;
 A_1, A_2, \dots, A_n - амплитуды гармоник от 1 до N;
 $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ - фазы гармоник в радианах;
 $\omega(\omega_{\text{сигн}})$ - частота первой гармоник, рад/с;
 N - число исследуемых гармоник;
 x - текущая точка.

ЧИСЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИВОЙ:
 Действущ. значение: $Y_d = 6.0324$
 Среднее значение: $Y_{\text{ср}} = 5.1400$
 Коэфф. несинусоид.: $Y_{\text{нс}} = 0.2143$

Для ПРОДОЛЖЕНИЯ нажмите <Enter>

а

Гармоника	Амплитуда	Фаза в градусах
1	8,339	-10,081
2	0,000	0,000
3	0,995	131,244
4	0,000	146,348
5	1,224	46,437
6	0,000	-125,558
7	0,245	-83,885
8	0,000	0,000
9	0,719	-153,207
10	0,000	0,000
11	0,124	102,921
12	0,000	65,206
13	0,176	-155,809
14	0,000	64,828
15	0,008	-59,556
16	0,000	0,000
17	0,214	96,65
18	0,000	109,678
19	0,181	85,769

б

Рис. 11 – Результаты расчета кривой тока, потребляемого ЖК Philips:

а – скриншот расчета в программе GARM I; б – результаты расчета кривой тока, потребляемого ЖК Philips, в программе GARM I

Fig. 11 – The resultant calculations of current curve consumed by TV Philips:

а – screenshot of the piece of programme (GARM I programme used); б – the resultant calculations of the current curve consumed by liquid crystal TV Philips in GARM I

На рис. 12 и 13 приведены осциллограммы тока в компьютере, работающем без источника бесперебойного питания и с ним соответственно.

В случае однофазных нелинейных нагрузок, например осветительных, в потребляемом токе присутствуют гармоники, кратные трем, которые суммируются в нулевом рабочем проводе вместе с нулевой последовательностью токов первой гармоники, обусловленной несимметрией подключения однофазных нагрузок.

Для проведения необходимых измерений используется электрическая сеть лабораторий кафедры СЭСП, однолинейная принципиальная схема которой приведена на рис 14. Центром электропитания помещений кафедры является распределительный щит (РЩ), расположенный в аудитории II-323. В РЩ имеется вводный автомат и автоматы отходящих линий, а также расположены два измерительных прибора: электросчетчик DELTAplus прямого включения и устройство UMG 96S, подключенное к сети через три трансформатора тока с коэффициентом трансфор-

мации 5/5. На вводе рабочей нейтрали в РЩ установлен трансформатор тока, служащий для измерения величины высших гармоник тока в нулевом рабочем проводе.

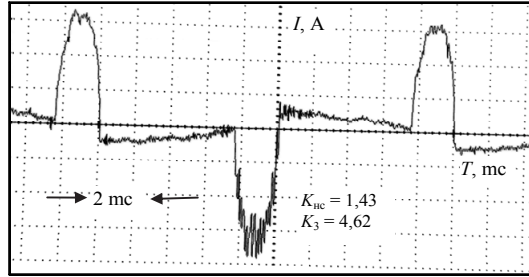


Рис. 12 – Осциллограмма тока компьютера без источника бесперебойного питания
 Fig. 12. – The oscillogramm of current consumed by PC without on-line UPS

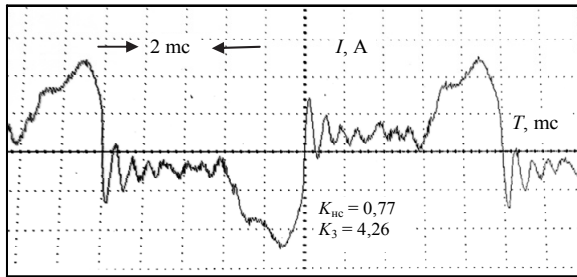


Рис. 13 – Осциллограмма тока компьютера с источником бесперебойного питания
 Fig. 13 – The oscillogramm of current consumed by PC with on-line UPS

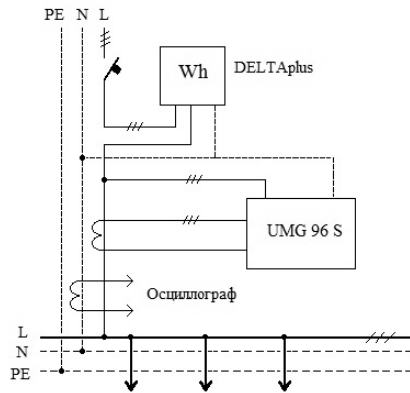


Рис. 14 – Однолинейная схема распределительного щита
 Fig. 14 – The one line scheme of distribution shield

На рис. 15 приведена осциллограмма тока в нулевом рабочем проводе системы освещения, выполненной люминесцентными лампами. Коэффициент несинусоидальности этого тока составил довольно большую величину (3,7), что обусловлено большим суммарным по всем лампам током третьей гармоники, равном 3,4 тока первой гармоники. Сумма токов третьей гармоники вводной части схемы электроснабжения здания (в РУ 0,4 кВ ТП) в целом может составить ощутимую величину. С ростом суммарной мощности однофазных нелинейных нагрузок этот ток может вызвать ущерб в работе системы электроснабжения здания.

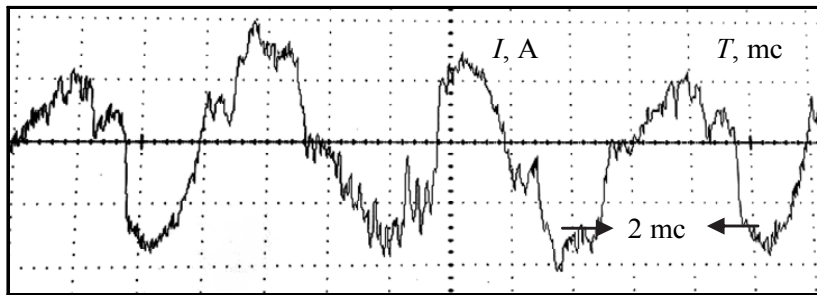


Рис. 15 – Осциллограмма тока в нулевом рабочем проводе

Fig. 15 – The neutral conductor's current oscillogram

Высшие гармоники напряжения в рассмотренной электросети здания определяются суммарными высшими гармониками токов в элементах сети и сопротивлением этих элементов.

Как показали измерения высших гармоник напряжения с помощью устройства JANITZA UMG96S и компьютерной программы GridVis, высшие гармоники напряжения в рассмотренной сети электропитания, не превышают величины 2,5 %, что допустимо в соответствии с ГОСТ 32144–2013.

3. Выводы

В последнее время в связи с ростом числа используемой бытовой техники ожидается тенденция к росту влияния высших гармоник со стороны потребителя на работу сети напряжением до 1000 В.

Как показывает анализ, в последнее время наметилась тенденция преобладания высших гармоник тока нелинейных мелких потребителей над высшими гармониками потребителей большой мощности. Так, высшие гармоники осветительной нагрузки в нулевом проводе составляют порядка 30 % от фазного тока, что может привести к существенному ущербу потребителя.

В связи с этим требуется разработка новых методик по анализу высших гармоник тока и способов их устранения в сетях до 1000 В. Эта задача со временем становится все актуальнее и ее необходимо решать двумя путями. Первый – уменьшение тока высших гармоник нелинейных нагрузок за счет совершенствования их конструкции, второй – применение специальных фильтрокомпенсирующих устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lagostena L., Mantini A., Silvestri M.** Disturbances produced by domestic appliance by thyristors: experiments and studies conducted for the purpose of preparing adequate standards // IEE Conference Publications. – 1974. – Vol. 110. – P. 209–213.
2. **Kusters N.L., Moore W.J.M.** On definition of reactive power under non-sinusoidal conditions // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1980. – Vol. PAS-99, iss. 5. – P. 1845–1854.
3. **Leonard W.** Control of electrical drives. – Berlin: Springer, 1996. – 420 p.
4. **Mohan N., Undeland T.M., Robins W.P.** Power electronics: converters, application and design. – New York: John Wiley&Sons, 1995.
5. **Myateg T.V.** The analysis of higher harmonic components influence on the electric circuit at induction motor functioning equipped with adjustable-frequency electric drive // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 173–177.
6. **Povh D., Weinhold M.** Improvement of power quality by power electronic equipment: report CIGRE 13/14/36-06. – Paris, 2000.
7. **Akagi H., Kasazawa Y., Nabae A.** Instantaneous reactive power compensators comprising devices without energy storage components // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1984. – Vol. IA-20, iss. 3. – P. 625–630.
8. Control in power electronics / ed. by M.P. Kazmierkowski, R. Krishnan, F. Blaabjerg. – New York: Academic Press, 2002.

**PREDICTIONS OF CIRCUIT HIGH HARMONICS VALUES
INCREASE IN THE NETWORKS OF UP TO 1000 V**

Olhovskiy V.Ya., Myateg T.V., Nayaksov S.Yu.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

One of the most important features of up-to-date technical progress in power engineering is continuous increase of so called non-linear loads in amount and power. Such loads in electrical network result in high harmonics voltage which cause a number of negative effects in electrical network equipment functioning. The valve inverter and regulating devices are the most widely used among non-linear loads. This devices operate at 380/220 V. This work is aimed at analyzing high harmonics currents consumed by modern widely used non-linear electrical devices. Nowadays the exist a great variety of such devices which are constantly upgrading. Such a tendency is typical of any powersupply systems, for example industrial, urban, rural and others. That is why specialist involved in designing powersupply systems are more and more interested in unsinusoidality currents consumed by small non-linear loads.

This paper deals with analyzing the operating modes peculiarities of some small devices such as rechargers and home appliances power sources (TVs, computers, washing mashinesetc) consumed power of which is not high. Is analyzed the operation mode of the induction motor is also equipped with ACS 550 frequency converter. If larger number of such devices is used it is necessary to minimize up to standart values high harmonics current and voltage in 380/220 V networks.

Keywords: adjustable-frequency electric drive; pulse-duration modulation; higher harmonics strategy.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-84-97

REFERENCES

1. Lagostena L., Mantini A., Silversti M. Disturbances produced by domestic appliance by thyristors:experiments and studies conducted for the purpose of preparing adequate standarts. *IEE Conference Publications*, 1974, vol. 110, pp. 209–213.

2. Kusters N.L., Moore W.J.M. On definition of reactive power under non-sinusoidal conditions. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1980, vol. PAS-99, iss. 5, pp. 1845–1854.
3. Leonard W. *Control of electrical drives*. Berlin, Springer, 1996. 420 p.
4. Mohan N., Undeland T.M., Robins W.P. *Power electronics: converters, application and design*. New York, John Wiley&Sons, 1995.
5. Myateg T.V. The analysis of higher harmonic components influence on the electric circuit at induction motor functioning equipped with adjustable-frequency electric drive. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 698, pp. 173–177.
6. Povh D., Weinhold M. *Improvement of power quality by power electronic equipment*. Report CIGRE 13/14/36-06. Paris, 2000.
7. Akagi H., Kasazawa Y., Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising devices without energy storage components. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1984, vol. IA-20, iss. 3, pp. 625–630.
8. Kazmierkowski M.P., Krishnan R., Blaabjerg F., eds. *Control in power electronics*. New York, Academic Press, 2002.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Ольховский Владимир Яковлевич – родился в 1942 году, канд. техн. наук, доцент кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: анализ и исследование качества электроэнергии в системах электроснабжения, анализ высших гармоник тока в сети напряжением до 1000 В. Опубликовано 30 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: V.Olhov@ya.ru).

Olhovskiy Vladimir Yakovlevich (b.1942) – Phd, Associate Professor at the Industrial Power Supply Systems Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on calculation analyses and investigation of electrical energy quantity in industrial power supply systems. He is author of 30 scientific paper. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: V.Olhov@ya.ru).



Мятеж Татьяна Владимировна – родилась в 1979 году, канд. техн. наук, доцент кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: анализ и исследование качества электроэнергии в системах электроснабжения, анализ высших гармоник тока в сети напряжением до 1000 В, оптимизация режимов работы генерирующих компаний и тепловых электрических станций. Опубликовано 19 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: tatianachekalina@ngs.ru).

Myateg Tatyana Vladimirovna (b. 1979) – Phd, Associate Professor of the Industrial Power Supply Systems Department in the Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on calculation analyses and investigation of electrical energy quantity in industrial power supply systems; optimization functioning of thermal electrical power stations. He is author of 19 scientific paper. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: tatianachekalina@ngs.ru).



Наяков Сергей Юрьевич – родился в 1993 году, магистр кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: анализ и исследование качества электроэнергии в системах электроснабжения, анализ высших гармоник тока в сети напряжением до 1000 В. Опубликовано 3 научных работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: genius-7@mail.ru).

Nayakov Sergey Yurievich (b. 1993) – master of Industrial Power Supply Systems Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on calculation analyses and investigation of electrical energy quantity in industrial power supply systems. He is author of 3 scientific paper. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: genius-7@mail.ru).

Статья поступила 29 сентября 2015 г.

Received September 29, 2015

To Reference:

Olhovskiy V.Ya., Myateg T.V., Nayakov S.Yu. Issledovanie vozdeistviya vysshikh garmonik melkikh nelineinykh potrebitelei na rabotu seti do 1000 V [Predictions of circuit high harmonics values increase in the networks of up to 1000 V]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 1 (30), pp. 84–97. doi: 10.17212/1727-2769-2016-1-84-97

УДК 621.311.21

**СИТУАЦИОННЫЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ ПОДСИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ СОСТАВОМ ГИДРОАГРЕГАТОВ НА ГИДРОСТАНЦИЯХ****Ю.А Секретарев¹, А.Д. Мехтиев²**¹*Новосибирский государственный технический университет*²*Карагандинский государственный технический университет*

Проведен анализ эксплуатации подсистемы рационального управления составом агрегатов в составе автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) на ряде гидроэлектростанций, таких как Красноярская, Воткинская, Саяно-Шушенская за последнее несколько десятков лет. Показаны преимущества и недостатки в работе, выявленные в процессе их промышленной эксплуатации. К достоинствам подсистемы РУСА можно отнести ее информационную и функциональную связи с другими технологическими подсистемами ГЭС, такими как групповое регулирование активной и реактивной мощности, а также регулирование частоты в энергосистеме. Основным недостатком заключается в жесткой алгоритмической структуре, что не позволяет адаптировать ее работу к изменяющимся режимам станции и энергосистемы. В связи с этим предложены способы совершенствования работы этой подсистемы, основанные на ситуационном подходе к управлению режимами работы гидростанции. Основная идея заключается в расширении функций подсистемы РУСА за счет блока интеллектуальной поддержки принятия решения.

Ключевые слова: гидростанции, автоматизированная система управления технологическими процессами, рациональное управление составом гидроагрегатов, ситуационный подход, интеллектуальная поддержка принятия решения.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-98-107

Введение

Если под текущей ситуацией C будем понимать совокупность всех сведений о структуре объекта управления и его функционировании в данный момент времени, а под полной ситуацией S – совокупность текущих ситуаций, знаний о самой системе управления объектом и о технологических особенностях процесса управления, то элементарный акт управления можно представить в следующем виде:

$$S_t : C_t \xrightarrow{u} C_{t+1}.$$

Смысл этого соотношения заключается в следующем. Если на объекте управления сложилась текущая ситуация C_t и состояние системы управления и технологические принципы управления, определяемые S_t , допускают использование управляющего воздействия U_k (одношаговое решение), то оно используется и текущая ситуация C_t превращается в C_{t+1} . После этого вступает в действие автоматика, обрабатывающая определенные параметры этого решения.

Изменение состава работающего оборудования на уровне управления ЭЭС определяется главным образом функцией поддержания баланса в энергосистеме. С позиций управления электрическими станциями функция поддержания баланса не является самоцелью. Для этого кроме ответа на вопрос, сколько включить или отключить единиц оборудования (выбор числа), необходимо решить также и

задачу выбора состава и степени его загрузки. Существенно, что на процесс принятия решения могут влиять, по меньшей мере, два режимных фактора.

1. Изменение текущей ситуации в ЭЭС, связанной с поддержанием баланса в ней.

2. Изменение текущей ситуации на станции, определяемой фактическим состоянием оборудования на ней с позиции *экономичности* и *надежности* его работы.

Таким образом, процесс принятия решения на заключительной фазе оперативного управления является *двухкритериальной* по своей сути.

1. Основная часть

Задача выбора состава работающего оборудования особенно актуальна для тех станций, которые имеют возможность полноценно участвовать в регулировании активной мощности, частоты, реактивной мощности и напряжения.

Из всех типов электрических станций наибольшей возможностью регулирования обладают гидростанции.

Идея создания автоматического устройства управления оптимальным числом работающих на ГЭС агрегатов возникла примерно в конце 30-х годов прошлого века на Харьковском электромеханическом заводе. Разработкой этого устройства занимались несколько научно-исследовательских и проектных организаций, начиная примерно с середины 50-х годов. Автооператор (АО) по своему назначению рассматривался как составная часть общей системы режимной автоматики ГЭС (рис. 1). Следует отметить, что в большей или меньшей степени такая трактовка сохранилась и до настоящего времени, что является, на наш взгляд, тормозом ее дальнейшего развития.

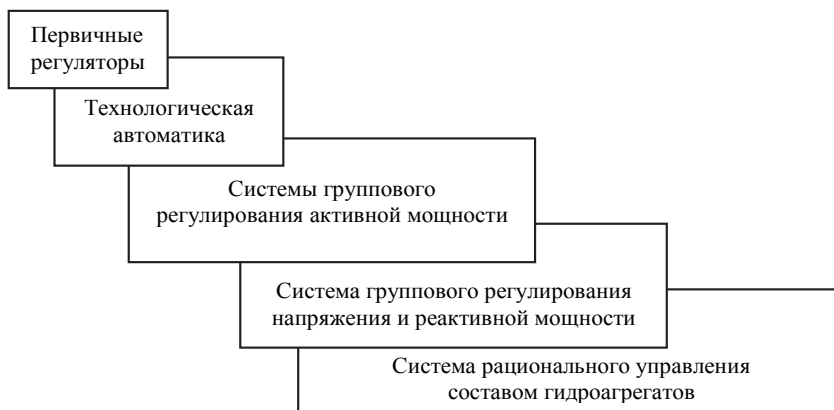


Рис. 1 – Автоматическое управление ГЭС

Fig.1 – Automatic control of hydropower station

Основные требования к работе АО формулировались следующим образом [1].

1. Число агрегатов должно соответствовать наименьшему расходу воды при заданной активной мощности ГЭС с учетом линий ограничений по турбине и генератору. При снижении мощности ГЭС «лишние» агрегаты должны останавливаться.

2. Включение и отключение гидроагрегатов как в генераторном режиме (ГР), так и в режиме синхронного компенсатора (СК), должно производиться при условии поддержания заданного уровня напряжения на шинах станции.

3. При аварийном отключении одного из работающих агрегатов АО должен немедленно послать импульс на пуск одного или нескольких агрегатов.

4. Порядок включения или отключения агрегатов устанавливается дежурным персоналом станции и может быть любым.

5. Выходные цепи АО должны использоваться для телеуправления числом работающих агрегатов и для отправки команды частотного пуска.

6. Автооператор должен вносить поправки в работу систем группового регулирования активной мощности (ГРАМ) и реактивной мощности (ГРПМ) в зависимости от количества агрегатов.

7. Автооператор должен обеспечивать заданную величину вращающего резерва.

8. Автооператор должен поддерживать минимальное заданное число агрегатов.

9. В АО должна быть предусмотрена отстройка от частых пусков и остановок агрегатов.

В работу АО закладывались следующие допущения:

- все гидроагрегаты имеют одинаковые энергетические характеристики;
- распределение активной мощности между работающими машинами осуществляется равномерно;
- реактивная нагрузка распределяется также равномерно между агрегатами, работающими как в ГР, так и в режиме СК, на основе статического уравнивания по току или напряжению ротора.

Опыт эксплуатации АО на различных ГЭС выявил существенные недостатки в их работе. Один из них был связан со сложностью учета на базе существующих автоматических устройств в автооператоре вышеперечисленных требований. Другой определялся жестко заложенными в АО алгоритмами, что не позволяло гибко конфигурировать программы его действий в соответствии с изменениями ситуаций на самой ГЭС и в энергосистеме, а именно:

1) отсутствие учета индивидуальности энергетических характеристик гидроагрегатов, различие которых в КПД достигает величины 0,5...1,5 % [2, 3, 6]. Поэтому наряду с задачей выбора оптимального числа агрегатов должна также решаться и задача выбора оптимального состава, которая в АО не была предусмотрена;

2) отсутствие возможности гибкого учета текущего состояния гидроагрегатов. Изменение эксплуатационного состояния гидроагрегатов (температурного, электрического, вибрационного и др.) существенно влияет на число, состав агрегатов и их загрузку. На большинстве крупных гидростанций существуют также и зоны нежелательной (а иногда и недопустимой) работы гидротурбины по условиям кавитации;

3) отсутствие адекватного реагирования по каналам плановой и неплановой мощности ГЭС.

Это потребовало более тщательной проработки принципов и структур таких подсистем и определило основные направления разработок в области оптимизации состава работающего оборудования на ГЭС. Необходимо отметить, что эти исследования осуществлялись в рамках создания АСУ ТП, так как вычислительный потенциал управляющих вычислительных комплексов давал реальную возможность для совершенствования процесса управления на станции.

Остановимся на основных достижениях этих разработок. Прежде всего, необходимо было выявить те условия, которым должны были удовлетворять энергетические характеристики гидроагрегатов, а затем исследовать различные оптимизационные методы. Серьезные исследования в этом направлении велись в МЭИ, ЛПИ, ВНИИЭ, НЭТИ и других организациях. Значительный вклад в решение задач внутростанционной оптимизации гидроагрегатов был внесен научной школой

под руководством профессора Т.А.Филипповой (НЭТИ). Проведенные исследования дали возможность оценить экономическую эффективность внутростанционной оптимизации, сформировать требования к энергетическим характеристикам и провести сравнительную оценку оптимизационных методов, используемых для решения этих задач [3]. В частности, был разработан ряд упрощенных оптимизационных алгоритмов, которые позволяли решать поставленные задачи на управляющих вычислительных машинах в темпе процесса.

Большое внимание было уделено формированию структуры самой подсистемы управления составом и числом агрегатов с учетом требований более высоких уровней управления: работа по каналам плановой и неплановой мощности, поддержание заданной величины включенной мощности, быстрый (частотный) пуск гидроагрегатов и др. [4].

Эти исследования нашли практическую реализацию при разработке РУСА на таких гидростанциях как Красноярская, Воткинская, Саяно-Шушенская, Майнская, Вилуйская. Тем самым было сформировано «оптимизационное ядро» управления составом агрегатов на ГЭС.

Задача выбора оптимального числа и состава агрегатов решалась на основе метода ограниченного перебора вариантов, число которых ограничивалось минимальным и максимальным количеством агрегатов по условию покрытия заданной и фактической мощности станции. Это существенно упрощало поиск оптимального решения. Распределение нагрузки осуществлялось на основе других оптимизационных методов (равенства относительных приростов расхода воды на агрегатах, динамического программирования).

Регулирование режима станции по активной мощности непосредственно связано с регулированием напряжения на шинах станции и реактивной мощности. Поэтому подсистема РУСА имеет значительные информационные и алгоритмические связи с системой группового регулирования возбуждением ГЭС. В основу управления были положены следующие принципы. Любое изменение числа и состава гидроагрегатов координировалось по условию поддержания напряжения на шинах станции и загрузки гидроагрегатов по реактивной мощности. В некоторых случаях (низкий запас реактивной мощности, необходимость перевода из одного режима в другой) число и состав агрегатов выбирались на основе заведомо и жестко определенных принципов координации.

Для расширения возможностей управления числом и составом агрегатов необходимо выделить те ограничения, которые накладываются на режим работы гидростанций за счет изменения текущего эксплуатационного состояния и различных требований системного характера[5]. Их можно классифицировать по двум признакам.

1. **Безусловные** или жестко заданные и строго контролируемые на предмет их обязательного исполнения. К таким ограничениям можно отнести ограничения по мощности турбины и генератора, по нарушению предела передаваемой мощности по отходящей ЛЭП, выполнение требований по обязательно включенному числу и составу гидроагрегатов, которые зависят от надежности режима работы ЭЭС и др. Невыполнение таких требований однозначно приводит к отрицательным последствиям.

2. **Условные** или «мягкие», степень важности которых должна быть рассчитана и в соответствии с этим как бы «дозирована». К таким ограничениям относится значительная часть информации систем контроля за электрическими, механическими, тепловыми, вибрационными параметрами, срабатывание предупредительной сигнализации на агрегатном уровне, поддержание оптимального регулировочного диапазона по активной мощности на станционном уровне и др.

Первый вид ограничений относительно просто учесть в алгоритмах внутри-станционной оптимизации, в которые они могут быть заложены заранее. Учет же фактического эксплуатационного состояния гидроагрегатов и его прогноз в виде условных ограничений зависят от изменения текущей ситуации и максимально эффективны при *превентивном* управлении режимом ГЭС.

Подводя определенный итог развитию программных систем рационального управления составом агрегатов, можно констатировать следующее. Придя на смену достаточно примитивному автоматическому устройству по изменению числа агрегатов на ГЭС (автооператору), программная система РУСА во многом ликвидировала те недостатки, которые были ему присущи, но породила ряд новых. Остановимся на них.

Беспрецедентное развитие в последнее время компьютерной техники, появление достаточно строгого аксиоматического аппарата описания процессов управления в теории принятия решений, теории возможностей, синергетике предоставляют исследователям возможности не только для описания самих процессов такого управления, но и решения ряда задач, с которыми они не сталкивались ранее.

Появилась возможность описать процесс управления при изменении текущей ситуации на станции путем выбора состава работающего оборудования, учитывая, что принятие решения производится лицом, принимающим решение (ЛПР), в условиях неопределенности и расплывчатости информации о режимах работы ЭЭС:

$$S : S_t \times S_t^3 \times S_t^H \xrightarrow{U^*} S_{t+1}^C, \quad (1)$$

где S – полная ситуация; S_t – текущая ситуация в ЭЭС, сформулированная в виде требований, которые предъявляются к работе электростанции по условиям покрытия активной и реактивной нагрузок; S_t^H , S_t^3 – текущие ситуации, связанные с фактическим режимом станции, которые определяются экономичностью и надежностью работающего на ней оборудования; U^* – вектор многоцелевого управления; S_{t+1}^C – новая текущая ситуация на станции, как декартово произведение предшествующих.

В соответствии с описанием нормального режима работы ЭЭС под декартовым произведением понимается конъюнктивная свертка текущих ситуаций:

$$S_{t+1}^C \supseteq S_t \times S_t^3 \times S_t^H = \inf(S_t, S_t^3, S_t^H). \quad (2)$$

Так как изменение текущей ситуации производится в данном случае путем изменения состава работающего на электростанции оборудования, то имеет место проекция этих ситуаций в общем, режимном пространстве Ω , т.е.

$$\text{Pr oj}(S_{t+1}^C) \supseteq \text{Pr oj}(S_t) \cap \text{Pr oj}(S_t^3) \cap \text{Pr oj}(S_t^H). \quad (3)$$

Формат проекций определяется как видом управления U^* .

Формирование вектора многоцелевого управления U^* в рамках описываемого процесса представляет собой многоцелевую свертку вида:

$$U^* = DE(KS_t, KS_t^3, KS_t^H), \quad (4)$$

где DE определяется некоторой логико-множественной операцией, с помощью которой осуществляется сворачивание целей или критериев KS_t , KS_t^3 и KS_t^H .

Учитывая, что в теории принятия решения отношения предпочтений выбора рассматриваются обычно в качестве бинарных, перепишем (4) в следующем виде:

$$U^* = DE_1 \left[DE_2 \left(KS_t^S, KS_t^H \right), KS_t \right]. \quad (5)$$

Здесь важно отметить, что свертки DE_1 и DE_2 в (5) в общем случае могут быть различными.

Учитывая вышесказанное, можно сделать следующие выводы.

1. В самом назначении системы оперативного управления числом и составом гидроагрегатов объективно заложены два взаимосвязанных аспекта управления. С одной стороны – это автоматическое регулирование режима агрегатов путем выбора числа, состава и распределение нагрузки между агрегатами в составе режимной автоматики ГЭС. С другой стороны – это оперативное диспетчерское управление, которое определяется текущими изменениями как режимов гидроагрегатов, так и станции. Здесь основным средством управления выступает не столько режимная автоматика (которая осуществляет процесс регулирования), сколько способность человека принимать решения. Такая двойственность нашла свое отражение даже в названии этих устройств: автоматический оператор (АО) и подсистема рационального управления составом агрегатов (РУСА).

2. Имеет место различная степень научной проработки принципов и структуры этой системы с точки зрения двойственности управления. Основное внимание уделялось созданию такой системы, которая могла бы автоматически управлять режимами ГЭС с учетом формализованных оперативных и диспетчерских требований, т. е. созданию не управляющей, а регулирующей системы. Несмотря на большие теоретические и практические успехи в этой сфере, следует признать это направление неплодотворным с точки зрения его дальнейшего развития. Оно подразумевает формирование лишь одного решения, жестко определенного процедурой формализации различных ограничений и требований, степень неадекватности которого действительной текущей ситуации практически всегда имеет место.

Таким образом, процесс ситуационного управления составом агрегатов на станции является двойственным и представлен на рис. 2. Точка разветвления процесса управления определяется способом его реализации, а именно:

– **процесс регулирования** осуществляется с помощью режимной и технологической автоматики станции, в частности подсистемой рационального управления составом агрегатов (РУСА);

– **процесс управления** (принятия решения) осуществляется ЛПР с использованием возможностей подсистемы интеллектуальной поддержки принятия решений (ИНПОР).

На рис. 3 приведена структура задач для ситуационного управления гидроагрегатами. Каждый из блоков представляет собой определенный класс задач, результат решения которых может быть использован ЛПР в качестве интеллектуальной поддержки для принятия решения об изменении режима станции. Целесообразно в связи с этим оговорить общие характеристики каждого класса задач. Оценка текущей эксплуатационной надежности (блок 1) может быть получена на основе контроля параметров, характеризующих надежность работы агрегатов станции. На основании этой информации можно получить прогнозные оценки изменения этого состояния, которые используются для формирования предпочтительной шкалы включаемых в сеть агрегатов из числа резервных, а также для корректировки сроков и объемов текущих ремонтов (блок 2). Получение текущих энергетических характеристик агрегатов (блок 3) и расчет на их основе фактических КПД является неизменным условием для корректного

осуществления управления. Задачи, объединенные в блоке 4, представляют то «оптимизационное ядро», о котором шла речь выше.

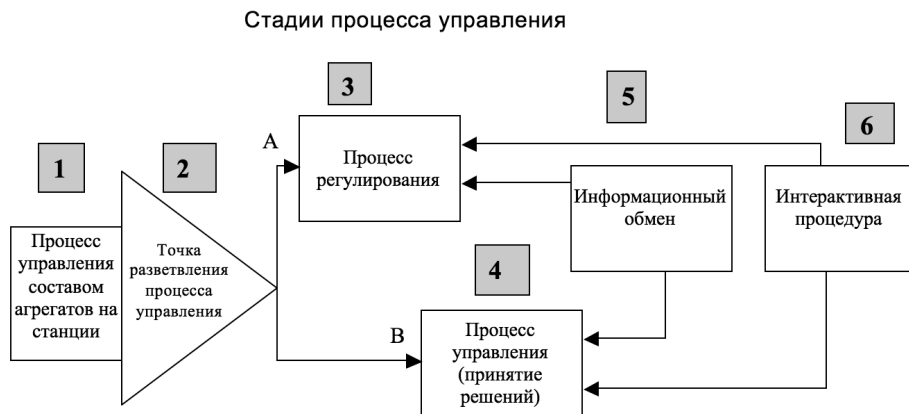


Рис. 2 – Ситуационное управление составом агрегатов на станции

Fig. 2 – Situational operating of the members of hydropower units

Экспресс-прогноз режима работы станции ориентирован на получение изменений ее активной и реактивной нагрузок с упреждением в 15...30 минут, что составляет ширину временного окна для диспетчерских корректировок. Это позволяет рассматривать требования, которые предъявляются к станции со стороны ЭЭС, как изменение текущей ситуации в энергосистеме, и реализовывать превентивное управление режимами станции.

Все вышеперечисленные классы задач являются подготовительным этапом для принятия решений об изменении текущей ситуации на станции (блок 6). Основные положения этого этапа изложены в [7, 8].

Принятое решение реализуется в блоке отработки 7 режимной и технологической автоматике станции в виде: включить (отключить) определенный агрегат в генераторном режиме (то же – в режиме синхронного компенсатора); загрузить (разгрузить) агрегат на определенную величину мощности; перевести из генераторного режима в режим синхронного компенсатора и наоборот. В случае нару-

шения одной из перечисленных выше операций через блок автоматического контроля отработки (блок 8) выдается информация о невозможности реализовать данное решение.



Рис. 3 – Структура задач оперативного управления составом агрегатов на ГЭС

Fig.3 – Structure of the tasks of operating of hydropower units

Интерактивный характер процедур в рамках целостного процесса управления режимами станции позволяет ЛПР с максимальной степенью адекватности реагировать на изменение ситуации на станции в ЭЭС. Все процедуры, входящие в интеллектуальную систему поддержки принятия решения, ориентированы на превентивный характер управления путем прогнозирования ряда параметров.

Заклучение

Анализ промышленной эксплуатации подсистемы рационального управления составом агрегатов (РУСА) в составе АСУ ТП показал преимущества и недостатки в ее работе. Предлагаются способы совершенствования работы подсистемы РУСА, основанные на ситуационном подходе к проблеме управления режимами работы ГЭС. Показана необходимость в дополнении подсистемы РУСА блоком интеллектуальной поддержки принятия решения, базирующейся на основных достижениях современной науки. Предложена структура задач оперативного управления составом гидроагрегатов на ГЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Урин В.Д. Опыт разработки и эксплуатации автооператоров гидростанций. – М.: Энергия, 1969. – 100 с.
2. Урин В.Д., Кутлер П.П. Энергетические характеристики для оптимизации режима электростанций и энергосистем. – М.: Энергия, 1980. – 136 с.
3. Филиппова Т.А. Оптимизация энергетических режимов гидроагрегатов гидроэлектростанций. – М.: Энергия, 1975. – 207 с.
4. Жирнов В.Л., Секретарев Ю.А. Формирование структуры заданий внутростанционной оптимизации в АСУ ТП ГЭС // Управление режимами и развитием энергетических систем в условиях АСУ: межвузовский сборник научных трудов / Новосибирский электротехнический институт. – Новосибирск, 1977. – С. 122–129.
5. Филиппова Т.А., Секретарев Ю.А., Мошкин Б.Н. Оценка эксплуатационного состояния гидроагрегатов в АСУ ТП ГЭС // Электрические станции. – 1988. – № 11. – С. 43–46.
6. Секретарев Ю.А., Дроздов Д.М. Возможность получения и использования энергетических характеристик гидроагрегатов в темпе процесса // Электрические станции. – 1994. – № 8. – С. 19–23.
7. Секретарев Ю.А. Модели ситуационного оперативного управления составом агрегатов на гидростанциях // Научный вестник НГТУ. – 2000. – № 1 (8). – С. 158–167.
8. Sekretarev Yu.A., Mitrofanov S.V. Preventive control taking into account of an operational condition power equipment and flowing path of hydropower plant // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2013. – Т. 6, № 1. – С. 3–14.

**SITUATIONAL APPROACH TO CREATING SUBSYSTEMS
OPERATE THE MEMBERS OF A HYDROPOWER UNITS (RUSA)**

Sekretarev Yu.A.¹, Mehtiev A.D.²

¹*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

²*Karaganda State Technical University, Karaganda, Republic Kazakhstan*

The analysis of the using of on-line subsystem operate the members of a hydropower units (RUSA) in the last few decades. The advantages and the shortcomings identified in the course of their commercial operation. The proposed methodology of improvement of this subsystem based on the situational approach. The basic idea is to complement subsystem of intellectual support of decision making, based on the main achievements in the theory of decision making, the theory of possibilities and synergetica.

Keywords: hydropower station, on-line operating system, on-line subsystem operate the members of a hydropower units, situational approach, intelligent decision support.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-98-107

REFERENCES

1. Urin V.D. *Opyt razrabotki i ekspluatatsii avtooperatorov gidrostantsii* [Experience in the development and operation of the hydro power station manipulators]. Moscow, Energiya Publ., 1969. 100 p.
2. Urin V.D., Kutler P.P. *Energeticheskie kharakteristiki dlya optimizatsii rezhima elektrostantsii i energosistem* [Power characteristics for optimization power plants and power systems]. Moscow, Energiya Publ., 1980. 136 p.
3. Fillipova T.A. *Optimizatsiya energeticheskikh rezhimov gidroagregatov gidroelektrostantsii* [Optimization of the energy regimes of hydropower units]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 207 p.
4. Zhirnov V.L., Sekretarev Yu.A. [Formation of the structure of jobs for optimization hydro power station]. *Upravlenie rezhimami i razvitiem energeticheskikh sistem v usloviyakh ASU* [Management regimes and the development of energy systems]. Novosibirsk electrical engineering institute. Novosibirsk, 1977, pp. 122–129.

5. Filippova T.A., Sekretarev Yu.A., Moshkin B.N. Otsenka ekspluatatsionnogo so-stoyaniya gidroagregatov v ASU TP GES [Assessment of the operational status of hydro power units]. *Elektricheskie stantsii – Power Technology and Engineering*, 1988, no. 11, pp. 43–46. (In Russian)
6. Sekretarev Yu.A., Drozdov D.M. Vozmozhnost' polucheniya i ispol'zovaniya energeticheskikh kharakteristik gidroagregatov v tempe protsesssa [The possibility of obtaining and using energy characteristics of the hydro power units on-line]. *Elektricheskie stantsii – Power Technology and Engineering*, 1994, no. 8, pp. 19–23. (In Russian)
7. Sekretarev Yu.A. Modeli situatsionnogo operativnogo upravleniya sostavom agregatov na gidrostantsiyakh [Situational models of on-line operate of hydro power units]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2000, no. 1 (8), pp. 158–167.
8. Sekretarev Yu.A., Mitrofanov S.V. Preventive control taking into account of an operational condition power equipment and flowing path of hydropower plant. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii – Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 3–14.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Секретарев Юрий Анатольевич – д-р техн. наук, профессор кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов включает вопросы ситуационного управления энергетическими объектами и технологическими процессами в энергетике. Автор более 250 научных и учебно-методических работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, проспект Карла Маркса 20. E-mail: sekretarevua@mail.ru).

Sekretarev Yury Anatolevich – Doctor of Sciences (Eng.), Professor at the Systems of an Electrical Supply of the Enterprises Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on issues of situational management of energy objects and technological processes in the energy sector. He is author of more than 250 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sekretarevua@mail.ru).



Мехтиев Али Джаванширович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и систем связи Карагандинского государственного технического университета. Автор около 300 научных и учебно-методических работ. Сферой научных интересов являются вопросы возобновляемой и альтернативной энергетики, энергосберегающих технологий управления на основе телекоммуникаций. (Адрес: 100027, Республика Казахстан, Караганда, бульвар Мира, 56. E-mail: barton.kz@mail.ru).

Mehtiev Ali Dzhavanshirovich – Candidate of Sciences (Eng.), Senior Lecturer at the Technology and Communication System Department in the Karaganda State Technical University. His research interests are currently focused on issues renewable and alternative energy, energy-saving control technologies based on telecommunications. He is author of more than 300 scientific papers. (Address: 56, Mira Blvd., Karaganda, 100027, Republic Kazakhstan. E-mail: barton.kz@mail.ru).

Статья поступила 30 сентября 2015 г.

Received September 30, 2015

To Reference:

Sekretarev Yu.A., Mehtiev A.D. Situatsionnyi podkhod k sozdaniyu podsistemy upravleniya sostavom gidroagregatov na gidrostantsiyakh [Situational approach to creating subsystems operate the members of a hydropower units (RUSA)]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 1 (30), pp. 98–107. doi: 10.17212/1727-2769-2016-1-98-107

УДК 612.59:004(076.5)

**ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА
НА ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМЕ
«ЧЕЛОВЕК – ТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА – ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА»**

А.В. Чичиндаев, Ю.В. Дьяченко, И.В. Хромова

Новосибирский государственный технический университет

В статье рассматриваются проблемы моделирования тепловых процессов в элементах системы «человек – тепловая защита – окружающая среда». Представлена методика моделирования процессов теплообмена в системе термостабилизации человека (СТС). Описываются механизмы работы СТС, направленные на поддержание теплового комфорта организма, а также механизмы регуляции мощности внутренних тепловыделений. Так как отличительными особенностями предлагаемой методики является учет конвективного переноса тепла между «ядром» и «оболочкой», в статье рассматривается влияние внешней работы на перераспределение теплоносителя между ними. Проводится анализ суммарных тепловых потерь в зависимости от мощности внутренних источников тепла, описывается вклад отдельных составляющих теплового потока для различных значений мощности. Представлены результаты модельных исследований влияния постоянной по времени и переменной мощности внутренних источников тепла на тепловые потери, а также средне-массовые температуры элементов и температуры на границах расчетных слоев. Отдельное исследование посвящено анализу влияния физической нагрузки при различных температурах окружающей среды с учетом внешней теплоизоляции (защитной одежды). Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем реабилитации и индивидуальной защиты от теплового перегрева и переохлаждения.

Ключевые слова: процессы теплообмена, внутренние источники тепла, термические сопротивления, теплоизоляция, низкие температуры.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-108-115

Введение

Одной из актуальных задач при разработке систем жизнеобеспечения является исследование воздействия охлаждения на организм человека. Важным параметром, влияющим на процесс теплообмена в системе «человек – тепловая защита – окружающая среда» является учет внутренних тепловыделений организма.

Механизм увеличения теплообразования при понижении температуры окружающей среды заключается в увеличении скорости обменных процессов в различных тканях. Часть тепла образуется во внутренних органах с интенсивным обменом веществ, однако основную часть источников тепловыделений (65...90 %) составляют мышцы. При мышечной работе накопленная в мышцах химическая энергия только на одну треть переходит в механическую работу, остальные две трети переходят в теплоту. В зависимости от интенсивности выполняемых работ мощность внутренних источников тепла составляет от 100 до 1000 Вт.

1. Модель системы терморегуляции человека

Для моделирования работы системы термостабилизации человека используется условное разделение объекта на «оболочку» – покровные ткани тела и «ядро» –

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-38-00257.

внутренние органы и мышцы [1]. Это многослойная многоэлементная модель, в которой каждая часть тела представлена расчетным элементом (рис. 1) с соответствующим количеством и видом слоев [6].

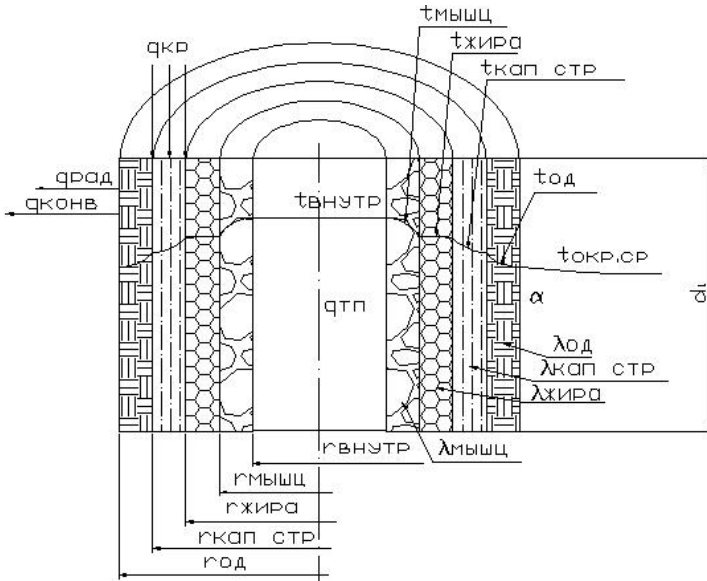


Рис. 1 – Расчетный элемент

Fig. 1 – Element for modeling

Кровеносная система работает совместно с системой терморегуляции (СТР) и осуществляет перенос тепла от внутренних органов к поверхности тела. Для расчета процесса охлаждения используется система нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности для каждого расчетного элемента (многослойной цилиндрической стенки) с учетом тепловых процессов, которые происходят в каждом из его слоев. В общем виде уравнение теплопроводности для расчетного слоя с наличием внутренних источников тепла имеет вид

$$c_j \rho_j \frac{\partial T_j}{\partial \tau} = \lambda_j \left(\frac{\partial^2 T_j}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_j}{\partial r} \right) + \lambda_j \frac{\partial^2 T_j}{\partial z^2} + q_v.$$

Внутренние источники тепла делятся на два вида. Первый $q_{\text{внутр}}$ – теплопродукция мышц $q_{\text{тп}}$ и внутренних органов $q_{\text{мет}}$, второй – перенос тепла теплоносителем по длине слоя $q_{\text{кр}}$, который напрямую зависит от свойств и количества поступившего в слой теплоносителя при заданных условиях [6]. При этом делается допущение о том, что ввиду малых размеров капилляров теплообмен между теплоносителем и тканями протекает с КПД = 1 до полного теплового равновесия:

$$q_v = q_{\text{внутр}} + q_{\text{кр}}.$$

Изменение теплового потока по длине слоя за счет процесса теплопроводности принимается равным нулю. Расчетный элемент разбивается на ряд элементарных геометрических объемов, в пределах которых закон изменения температуры может быть принят линейным. Для выбранного участка принимается следующее

допущение: в каждый текущий момент времени процесс теплообмена с окружающей средой является стационарным. Процесс распространения теплоты определяется значениями эффективного коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности. Плотность и удельная теплоемкость в пределах элемента изменяются незначительно и считаются постоянными. Коэффициент теплопроводности «ядра» принимается постоянным, а «оболочки» – линейной функцией температуры.

Граничные условия описывают температуры и тепловые потоки на стыке слоев и заданные параметры окружающей среды. В качестве начальных условий принимается нормальная температура ядра (36,7 °С).

В результате рассчитываются тепловые потоки, температуры на границах слоев и среднemasовые температуры. Проверка достоверности проведена путем сравнения полученных результатов с известными экспериментальными и расчетными данными, установлено качественное и количественное соответствие, расхождение не более 10 % [1–6].

2. Влияние внешней работы на перераспределение теплоносителя между элементами

При выполнении физической нагрузки значительно увеличивается приток теплоносителя к «оболочке» (в 4...8 раз) за счет прилива крови к мышцам и расширения сети подкожных капилляров с целью сбросить лишнее тепло в окружающую среду. Для оценки перераспределения теплоносителя между элементами и слоями моделируется физическая нагрузка 500 Вт и 1000 Вт (рис. 2). С увеличением мощности внутренних тепловыделений суммарные тепловые потери растут, однако наблюдается перераспределение вклада различных составляющих (рис. 3). Теплоотдача в окружающую среду растет за счет увеличения доли конвективной составляющей на 60 %, а также доли тепла, переносимого разогретым теплоносителем из «ядра» в «оболочку» на 80 % на начальной стадии охлаждения.

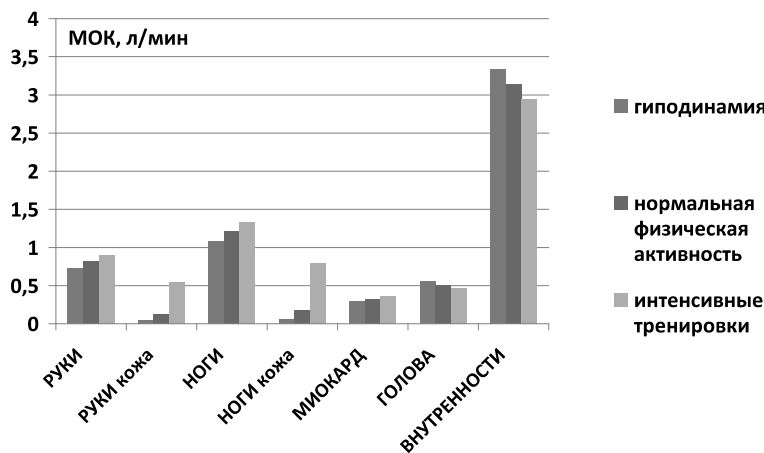


Рис. 2 – Влияние внешней работы на перераспределение теплоносителя между расчетными элементами и слоями

Fig. 2 – Influence of external work at the redistribution of the heat transfer fluid between the elements and layers

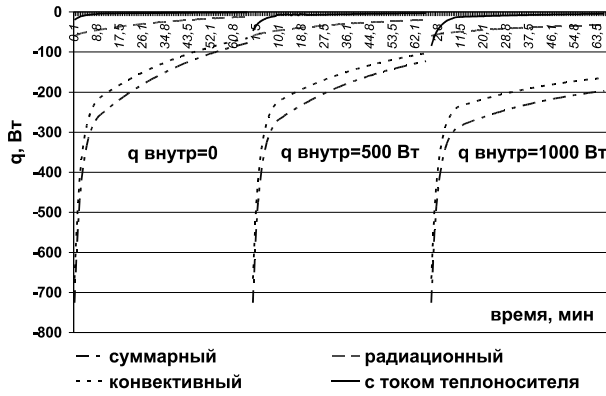


Рис. 3 – Влияние мощности внутренних источников тепла на тепловые потери руки

Fig. 3 – The effect of the internal heat sources on the heat losses hands

3. Влияние мощности внутренних источников тепла на процесс теплообмена

Для иллюстрации переменной мощности внутренних источников тепла рассматривается случай, когда физическая нагрузка максимальна на начальной стадии и ступенчато убывает к концу рассматриваемого периода времени. Расчеты представлены для трех вариантов (рис. 4): без внутренних тепловыделений, переменная мощность внутренних источников тепла (1000, 500 и 250 Вт) и постоянная мощность (1000 Вт). С ростом мощности внутренних источников тепла увеличивается разница между температурами на границах слоев. При отсутствии тепловыделений разница между температурами с внешней и внутренней стороны «оболочки» небольшая, но с ростом тепловыделений перепад температур увеличивается больше чем в 2 раза за счет притока подогретого теплоносителя. Показано, что при постоянной мощности характер изменения температуры среднего слоя «ядра» плавный, а при переменной мощности – ступенчатый.

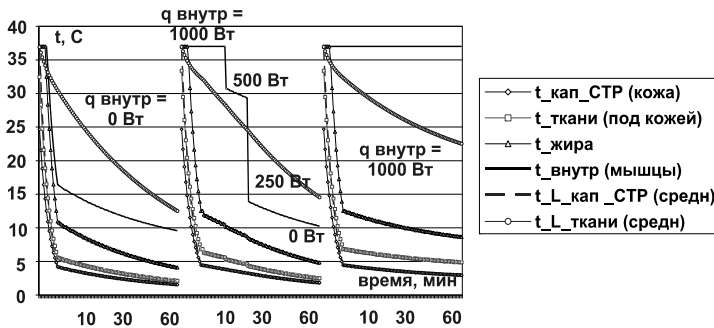


Рис. 4 – Температуры на границах слоев расчетных элементов в зависимости от характера мощности внутренних источников тепла

Fig. 4 – Temperatures at the boundaries of elements layers depending on the characteristics of internal heat sources

Анализ среднемассовых температур показал, что температура среднего слоя «ядра» (мышечная группа) и «оболочки» растет с увеличением мощности, а тем-

пература внутреннего слоя «ядра» (внутренние органы) падает (рис. 5). При отсутствии внутренних тепловыделений температуры расчетных элементов резко уменьшаются. В случае ступенчатой нагрузки мощность падает с 1000 до 500 Вт и температуры начинают уменьшаться, но с меньшим градиентом. Если нагрузка остается постоянной (1000 Вт), то охлаждение расчетных элементов происходит в 2...3 раза медленнее, чем при переменной нагрузке.

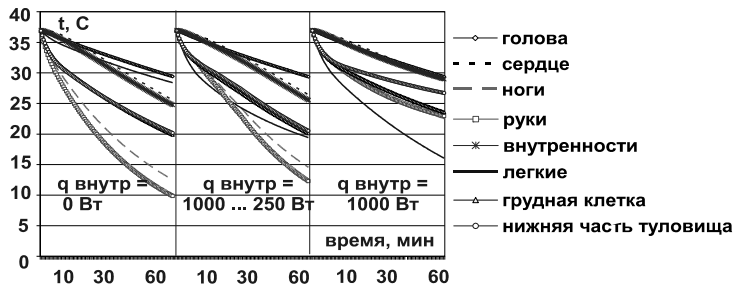


Рис. 5 – Зависимость среднемассовых температур элементов от характера изменения мощности внутренних источников тепла

Fig. 5 – Average mass temperatures of elements depending on the characteristics of internal heat sources

4. Исследование влияния величины теплового сопротивления защитной одежды на процесс охлаждения

Для оценки теплового сопротивления одежды используется специальная единица измерения – *clo* ($1 \text{ clo} = 0,155 \text{ м}^2 \text{ °C/Вт}$).

На рис. 6 представлен график зависимости времени охлаждения «ядра» до критической температуры (24 °C) от теплопродукции организма при температуре окружающей среды 0 °C . Линиями показана одежда с тепловым сопротивлением 3 clo (обычная синтепоновая одежда) и 7 clo (одежда из верблюжьей шерсти). На рис. 7 в том же виде представлены результаты расчета при -30 °C . Установлено, что при -30 °C время остывания при росте мощности увеличивается незначительно (на 10...20 мин). При 0 °C время остывания значительно увеличивается (на 3...5 часов) при мощности от 100 Вт. Для -30 °C , в отличие от 0 °C , большой разницы между двумя материалами не наблюдается (разница во времени охлаждения до критической температуры составляет от 2 до 10 минут).

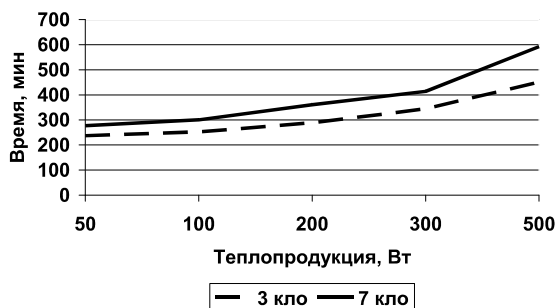


Рис. 6 – Зависимость времени охлаждения от величины теплопродукции при 0 °C

Fig. 6 – The cooling time depending on the of magnitude internal heat sources at 0 °C

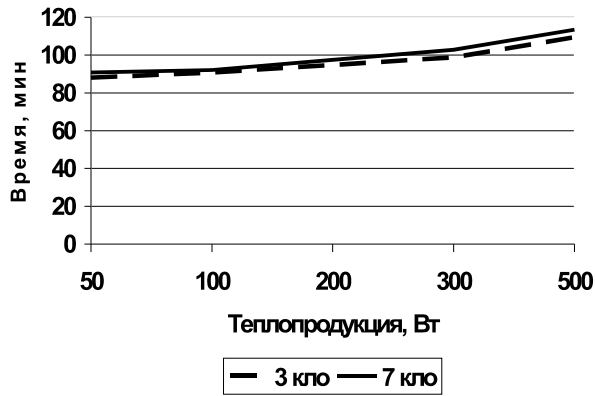


Рис. 7 – Зависимость времени охлаждения от величины теплопродукции при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 7 – The cooling time depending on the of magnitude internal heat sources at $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Заключение

Увеличение мощности внутренних источников тепла приводит к изменению характера температурных полей расчетных элементов в исследуемой системе. Увеличение мощности до 1000 Вт приводит к увеличению в 2 раза разницы температур между «оболочкой» и средним слоем «ядра». При этом температура внутреннего слоя «ядра» с ростом внутренних тепловыделений падает за счет постоянного притока охлажденного теплоносителя из «оболочки». Увеличение мощности внутренних источников тепла ведет к увеличению теплоотдачи в окружающую среду, однако наблюдается перераспределение вклада различных составляющих. Доля тепла, переносимого теплоносителем на начальной стадии охлаждения, с ростом мощности увеличивается в 2,5 раза. Переменная во времени мощность внутренних источников иллюстрирует реальный процесс охлаждения организма человека. Увеличение мышечной активности способствует повышению теплообразования на 25 ... 30 %. При очень низких температурах окружающей среды рост мощности внутренних источников тепла незначительно влияет на время остывания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чичиндаев А.В., Дьяченко Ю.В., Хромова И.В. Исследование термических сопротивлений слоев теплоизоляции в системе «человек – окружающая среда» // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – № 4 (25). – С. 137–142.
2. Дьяченко Ю.В., Чичиндаев А.В. Численное моделирование системы терморегуляции человека: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 40 с.
3. Дьяченко Ю.В., Спарин В.А., Чичиндаев А.В. Системы жизнеобеспечения летательных аппаратов: учебное пособие для вузов / под ред. Ю.В. Дьяченко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 512 с. – (Учебники НГТУ).
4. Чичиндаев А.В., Хромова И.В. Моделирование тепловых процессов системы «человек – окружающая среда» в условиях низких температур // Научный вестник НГТУ. – 2009. – № 4. – С. 197–201.
5. Хромова И.В. Исследование тепловых процессов в системе «человек – окружающая среда» в условиях низких температур: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2009. – 20 с.

6. Чичиндаев А.В., Фомичева И.В., Толстошеева В.В. Численное моделирование кровеносной системы человека // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2006. – № 11. – С. 35–46.

**EFFECT OF INTERNAL HEAT SOURCES ON THE PROCESSES
OF HEAT TRANSFER IN THE SYSTEM
«HUMAN - THERMAL PROTECTION – ENVIRONMENT»**

Chichindaev A.V., Dyachenko Y.V., Khromova I.V.
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The paper deals with the problems of thermal processes modeling, which occur in the elements of the system "human - thermal protection - environment." The simulation method of heat transfer processes in the human thermoregulatory system (HTS) is presented. Mechanisms of HTS aimed to support thermal comfort of the human organism and mechanisms of regulation internal heat sources described. Presented an analysis of influence of external work at the redistribution of the heat transfer fluid between the "core" and "shell". The analysis of cumulative heat loss, depending on the power of the internal heat sources, described the contribution of individual components of the heat flux for different values of power. Submitted the results of the modeling studies about the effect of internal heat sources characteristics (constant and variable) on the heat loss, average mass temperatures of the elements and on the temperature at the boundaries of elements layers. A separate study is devoted to the analysis of the effectiveness of physical exercise at different ambient temperatures, taking into account the external insulation (protective clothing). The results may be useful in the development of the systems individual protection and rehabilitation from thermal overheating and overcooling.

Keywords: processes of heat and mass transfer, internal heat sources, thermal resistance, heat insulation, low temperature.

DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-108-115

REFERENCES

1. Chichindaev A.V., Dyachenko Y.V., Khromova I.V. Issledovanie termicheskikh soprotivlenii sloev teploizolitsii v sisteme "chelovek – okruzhaiushchaia sreda" [Research of thermal resistance of the heat insulation in the system "human organism – environment"]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 4 (25), pp. 137–142.
2. Dyachenko Y.V., Chichindaev A.V. *Chislennoe modelirovanie sistemy termoregulyatsii cheloveka* [Numerical modeling of human thermoregulation system]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2000. 40 p.
3. Dyachenko Y.V., Sparin V.A., Chichindaev A.V. *Sistemy zhizneobespecheniya leta-tel'nykh apparatov* [Life-support systems of aircraft]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2003. 512 p.
4. Chichindaev A.V., Khromova I.V. Modelirovanie teplovykh protsessov sistemy "chelovek – okruzhaiushchaia sreda" v usloviakh nizkikh temperatur [Modelling of the thermal processes of system "human organism – environment" in cold temperature condition]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2009, no. 4, pp. 197–201.
5. Khromova I.V. *Issledovanie teplovykh protsessov v sisteme "chelovek – okruzhayushchaya sreda" v usloviakh nizkikh temperatur*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Research of thermal processes in system "human – environment" in cold temperature condition. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2009. 20 p.
6. Chichindaev A.V., Fomicheva I.V., Tolstosheeva V.V. Chislennoe modelirovanie krovenosnoi sistemy cheloveka [Numerical modeling circulatory system of the person]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie – Aerospace Instrument-Making*, 2006, no. 11, pp. 35–46.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Чичиндаев Александр Васильевич – родился в 1960 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано более 40 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, проспект Карла Маркса 20. E-mail: ttf_nstu@rambler.ru).

Chichindaev Aleksandr Vasil'evich (b. 1960) – Doctor of Sciences (Eng.), Professor, head of Engineering Thermophysics Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on thermal physics, theoretical the heating engineer. He is author of 40 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: ttf_nstu@rambler.ru).



Дьяченко Юрий Васильевич – родился в 1944 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технической теплофизики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано более 40 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, проспект Карла Маркса 20. E-mail: ttf_nstu@rambler.ru).

D'iachenko Iurii Vasil'evich (b. 1944) – Doctor of Sciences (Eng.), Professor, Professor at the Engineering Thermophysics Department in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on thermal physics, theoretical the heating engineer. He is author of 40 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: ttf_nstu@rambler.ru).



Хромова Ирина Владимировна – родилась в 1983 году, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технической теплофизики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано более 18 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, проспект Карла Маркса 20. E-mail: ttf_nstu@rambler.ru).

Khromova Irina Vladimirovna (b. 1983) – Ph.D., assistant professor, associate professor chair of Engineering Thermophysics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on thermal physics, theoretical the heating engineer. He is author of 18 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: ttf_nstu@rambler.ru).

Статья поступила 01 декабря 2015 г.

Received December 01, 2015

To Reference:

Chichindaev A.V., Dyachenko Y.V., Khromova I.V. Vliyanie vnutrennikh istochnikov tepla na protsessy teploobmena v sisteme "chelovek – teplovaya zashchita – okruzhayushchaya sreda" [Effect of internal heat sources on the processes of heat transfer in the system "human – thermal protection – environment"]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 1 (30), pp. 108–115. doi: 10.17212/1727-2769-2016-1-108-115

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Выпуск 1(30) январь–март 2016

Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 12.04.2016. Бумага офсетная. Формат 70×108 1/16
Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 10,15. Печ. л. 7,25. Изд. № 93. Заказ № 645

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20