

ISSN 2663-4228 (Print)
ISSN 2663-4236 (Online)

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ

*Основан в 1997 году,
«Серия Г: Технические науки»
основана в 2018 году*

Серия Г:
Технические
науки

3/2023

Редакционная коллегия журнала

«Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки»

Главный редактор – д-р техн. наук, проф. **В.В. Данилов.**

Зам. главного редактора – канд. техн. наук **И.А. Третьяков.**

Ответственный секретарь – канд. техн. наук **Е.Д. Пометун.**

Члены редколлегии: д-р техн. наук, проф. **Л.В. Алексейчик**; канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. **П.В. Асланов**; д-р техн. наук, проф. **С.А. Горожанкин**; канд. техн. наук, ст. науч. сотр. **А.А. Курушин**; канд. техн. наук, доц. **И.А. Молоковский**; канд. техн. наук, доц. **В.В. Паслён**; д-р техн. наук, проф. **А.С. Петров**; канд. физ.-мат. наук, доц. **В.И. Тимченко**; д-р техн. наук, доц. **К.А. Вытовтов**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Ермоленко**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Завадская**; д-р техн. наук, доц. **А.В. Звягинцева**; д-р техн. наук, доц. **С.А. Зори**; академик РАН, д-р техн. наук, проф. **И.А. Соколов**; д-р техн. наук, проф. **М.Н. Чепцов**; д-р техн. наук, доц. **Д.В. Шевцов**; д-р техн. наук, проф. **А.Б. Бирюков**; канд. техн. наук, доц. **С.В. Гридин**; д-р техн. наук, проф. **С.М. Сафьянц**; д-р техн. наук, проф. **В.К. Толстых**; канд. техн. наук, доц. **О.Г. Шелехова**; д-р техн. наук, проф. **Г.В. Аверин**; канд. техн. наук, доц. **Т.С. Башева**; д-р техн. наук, проф. **С.В. Борщевский**; д-р техн. наук, проф. **Н.Г. Насонкина**; д-р хим. наук, проф. **А.И. Сердюк.**

The Editorial Board of the journal

«Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences»

The Editor-in-Chief – Dr. of tech., prof. **V.V. Danilov.**

The Deputy of the Editor-in-Chief – Cand. of tech. **I.A. Tretiakov.**

Assistant Editor – Cand. of tech. **E.D. Pometun.**

The Members of the Editorial Board: Dr. of tech., prof. **L.V. Alekseichik**; Cand. of phys. and math., senior researcher **P.V. Aslanov**; Dr. of tech., prof. **S.A. Gorozhankin**; Cand. of tech., senior researcher **A.A. Kurushin**; Cand. of tech., docent **I.A. Molokovskii**; Cand. of tech., docent **V.V. Paslen**; Dr. of tech., prof. **A.S. Petrov**; Cand. of phys. and math., docent **V.I. Timchenko**; Dr. of tech., docent **K.A. Vytovtov**; Cand. of tech., docent **T.V. Ermolenko**; Cand. of tech., docent **T.V. Zavadskaja**; Dr. of tech., docent **A.V. Zviagintseva**; Dr. of tech., docent **S.A. Zori**; RAS Academician, Dr. of tech., prof. **I.A. Sokolov**; Dr. of tech., prof. **M.N. Sheptsov**; Dr. of tech., docent **D.V. Shevtsov**; Dr. of tech., prof. **A.B. Biriukov**; Cand. of tech., docent **S.V. Gridin**; Dr. of tech., prof. **S.M. Safiants**; Dr. of tech., prof. **V.K. Tolstykh**; Cand. of tech., docent **O.G. Shelekhova**; Dr. of tech., prof. **G.V. Averin**; Cand. of tech., docent **T.S. Basheva**; Dr. of tech., prof. **S.V. Borshchevskii**; Dr. of tech., prof. **N.G. Nasonkina**; Dr. of chem., prof. **A.I. Serdiuk.**

Адрес редакции: 283001, Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13.

Тел.: +7 (856) 302 07 81

E-mail: vestnik.donnu.g@donnu.ru

URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (**Перечень ВАК**) (Приказы МОН ДНР №440 от 06.03.2020 г., №42 от 26.01.2021 г.) по следующим группам научных специальностей (специальностям): **05.11.00** – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; **05.12.00** – Радиотехника и связь; **05.13.00** – Информатика, вычислительная техника и управление; **05.14.04** – Промышленная теплоэнергетика; **05.23.19** – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства.

Журнал включен в национальную информационно-аналитическую систему **РИНЦ** (Лицензионный договор № 378-06/2016 от 24.06.2016 г. в ред. от 27.03.2019 г.): http://elibrary.ru/title_about_new.asp?id=69984

Журнал включен в международную индексационную наукометрическую базу **Index Copernicus International Journals Master List**: <http://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=63327>

*Печатается по решению Ученого совета ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»:
Протокол №9 от 29.09.2023 г.*

**Вестник
Донецкого
национального
университета**

Серия Г: Технические науки

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ,
СЕРИЯ Г ОСНОВАНА В 2018 ГОДУ

Номер посвящён 75-летию
юбилею Владимира Васильевича
Данилова

№ 3/2023

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

- Яновский А.В., Третьяков И.А., Подлесный В.Ю., Антипов С.С.* Метод частотной модуляции в синтезаторах с разрывом петли ФАПЧ 3
- Банков С.Е., Давыдов А.Г., Курушин А.А.* Многомодовые печатные антенны для навигации 9
- Пометун Е.Д.* Влияние загрязнённости датчика температуры на его динамические параметры 19

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

- Максименко И.И., Котенко В.Н.* Распознавание в алгебрах Клини на идемпотентных полукольцах 24
- Третьяков И.А.* Целесообразность применения скрытых марковских моделей с явным образом заданной функцией плотности длительности состояний в АСНИ 33

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

- Попов А.И., Брагин Д.М., Зинина С.А., Еремин А.В.* Определение теплопроводности материала с упорядоченной структурой, основанной на трижды периодической минимальной поверхности Шварца Р, с учётом конвекции 39
- Бирюков А.Б., Гнителив П.А.* Диагностирование присосов воздуха в котел 46

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Горожанкин С.А., Савенков Н.В.* Исследование гибридной силовой установки для легких коммерческих автомобилей 52

ИНФОРМАЦИОННАЯ РУБРИКА

- 75-летию юбилею Владимира Васильевича Данилова 62
- Правила для авторов 64

Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997,
SERIES G FOUNDED IN 2018

Number dedicated to the 75th jubilee
of Vladimir Vasilevich Danilov

Series G: Technical sciences

№ 3/2023

CONTENTS

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND COMMUNICATION

- IAnovskii A.V., Tretiakov I.A., Podlesnyi V.IU., Antipov S.S.* The method of frequency modulation in synthesizers with a PLL loop break 3
- Bankov S.E., Davydov A.G., Kurushin A.A.* Multimode antennas for navigation 9
- Pometun E.D.* Influence of contamination of the temperature sensor on its dynamic parameters 19

INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

- Maksimenko I.I., Kotenko V.N.* Recognition in Kleeni algebras on idempotent semirings 24
- Tretiakov I.A.* The expediency of using hidden Markov models with an explicitly given function of the density of the duration of states in ASRS 33

ENERGETICS AND ELECTRICAL ENGINEERING

- Popov A.I., Bragin D.M., Zinina S.A., Eremin A.V.* Determination of the thermal conductivity of a material with an ordered structure based on a Schwartz P triply periodic minimal surface with convection 39
- Biriukov A.B., Gnitiev P.A.* Diagnosis of air suction in the boiler 46

TECHNOSPHERE SAFETY

- Gorozhankin S.A., Savenkov N.V.* Study of the electricpower plant for light commercial vehicles 52

INFORMATION SECTION

- 75th jubilee of Vladimir Vasilevich Danilov 62
- Instructions for authors 64

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

УДК 65.011.56:681.5.08

МЕТОД ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ В СИНТЕЗАТОРАХ С РАЗРЫВОМ ПЕТЛИ ФАПЧ

© 2023 Яновский А.В., Третьяков И.А., Подлесный В.Ю., Антипов С.С.

В данной работе предложена методика формирования частотной модуляции с разрывом петли фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Предложенный данный метод существенно быстрее цифрового, однако обладает пониженной точностью установки частоты, в виду особенностей формирования сигнала.

Ключевые слова: частотная модуляция, интегральный синтезатор, петля ФАПЧ.

Введение. Использование большого количества различных средств связи, а также огромные объемы передаваемой по ним информации требуют устойчивого функционирования беспроводных сетей передачи данных в условиях воздействия различных деструктивных факторов [1, 2], одним из которых отдельно выделяется фактор взаимодействия электромагнитного излучения различных устройств [3]. Взаимовлияние электромагнитных излучений может существенно ухудшить работу устройств, из-за чего появляется необходимость тестирования средств связи на устойчивость и помехозащищённость. Для формирования несущей частоты и тактовых сигналов в таких системах используются синтезаторы с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ), посредством которого можно получить промодулированный сигнал напрямую. Таким образом, данная работа является продолжением исследований авторов в области моделирования радиоэлектронных схем и систем, а также применения методов обработки радиоэлектронных сигналов [4-8].

Синтезатор частот с применением фазовой автоподстройки. В некоторых разработках наиболее удачным выбором является применение синтезатора частот с ФАПЧ [9, 10], который обеспечивает не только заданную точность и стабильность, но и позволяет изменять частоту. В первом приближении ФАПЧ синтезатор представляет собой контроллер с петлей обратной связи (рисунок 1) [9].



Рис. 1. Структурная схема синтезатора

Генератор, управляемый напряжением (ГУН), вырабатывает выходной сигнал. Частота задается LC-контуром, а регулируется с помощью постоянного входного напряжения с фазового детектора и петлевого НЧ-фильтра. На вход фазового детектора поступает стабильный опорный сигнал, вырабатываемый кварцевым резонатором. На второй вход фазового детектора подается сигнал с выхода ГУН-а, поделенный делителем частоты. Коэффициент деления может меняться в некотором диапазоне.

Частотная модуляция в синтезаторах с ФАПЧ. Существует несколько методов выполнения частотной модуляции, у каждого из которых свои достоинства и недостатки [10, 11]. Частотно-модулированный сигнал можно получить как аналоговым, так и цифровым способом.

Одним из аналоговых методов частотной модуляции (ЧМ) является прямая модуляция сигнала ГУН-а. Наиболее часто для этого устанавливается варикап для изменения емкости подстроечного LC-контура ГУН-а. Другой способ заключается в модулировании сигнала опорного генератора. В этом случае опорный сигнал берется не с прецизионного кварцевого резонатора с фиксированной частотой, а с LC-контура, частота которого меняется путем изменения емкости одного или нескольких варикапов. При цифровой модуляции ФАПЧ быстро изменяет коэффициент деления делителя, тем самым производя перестройку с передельным шагом. При аналоговом подходе сигнал модуляции поступает либо на RefClk, либо в ГУН. Преимуществами такого подхода является простота аппаратной части и реализации. К недостаткам относится непостоянство характеристик, т. е. необходимость в специальных мерах для того, чтобы сделать их постоянными для разных ГУН и частот модуляции. Недостатки аналогового подхода преодолеваются с помощью цифрового метода. Цифровой метод же имеет меньшее быстродействие, так как предполагает перепрограммирование синтезатора под каждую частоту отдельно.

В качестве основы макет была выбрана микросхема – интегральный синтезатор с ФАПЧ и смесителем MC44BS374T1, применяемая для формирования каналов кабельного и широкоэвещательного телевидения. Структурная схема блока синтезатора частот микросхемы приведена на рисунке 2.

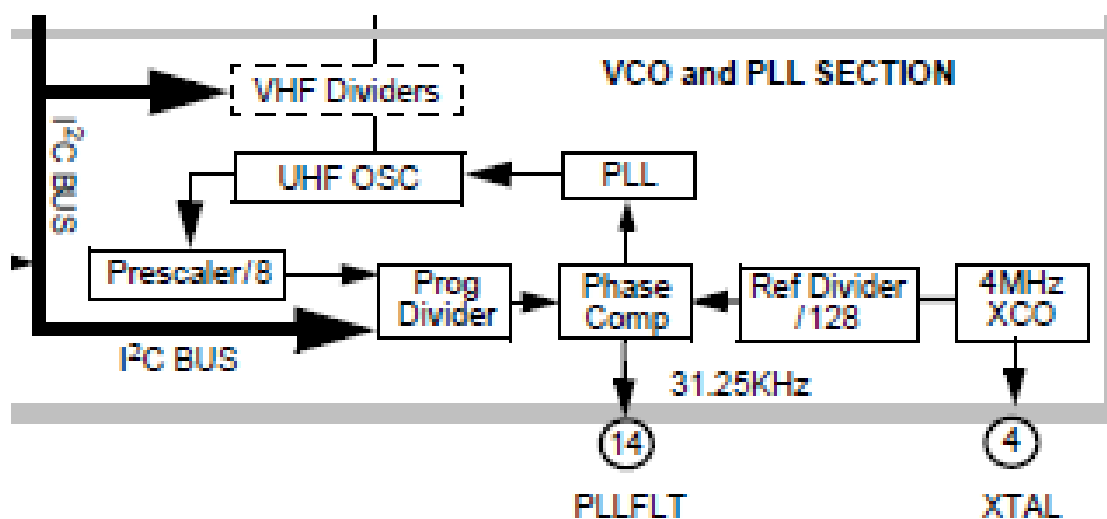


Рис. 2. Структурная схема блока ГУН-а с ФАПЧ

Методика формирования ЧМ с разрывом петли ФАПЧ. Оба вышеописанных метода ограничены в быстродействии. Так, цифровой метод ограничен в быстродействии суммой времени записи в регистры новой частоты и временем захвата петли ФАПЧ. Время установления захвата частоты цепочкой ФАПЧ составляет единицы - десятки миллисекунд, и ограничивает частоту перестроек до единиц-тысяч в секунду для цифрового метода, а при аналоговом методе формирования частоты данный эффект может, наблюдается при резком изменении частоты, например при модуляции не линейным законом (шумом), виду наличия фильтра низких частот в цепи. Избежать описанных недостатков можно применив метод предлагаемый далее.

Предлагается использовать метод косвенной установки частоты путем подачи модулирующего напряжения на ядро ГУН-а в обход петли ФАПЧ. По сути, система превращается в генератор, управляемый напряжением, и делители выходной частоты, а для управления генератором используется напряжение, изменяемое по определённому закону в определённом диапазоне. Данный подход имеет весьма существенный недостаток. Так, при изменении температуры, диапазон частот генерации будет смещаться, также на него может влиять и изменение напряжения питания, и множество других процессов, для компенсации которых изначально петля ФАПЧ и была использована. Компенсировать влияние данных процессов можно проводя многократную калибровку генератора с определением необходимых границ модулирующего напряжения. При этом однократная калибровка в начале работы устройства, или же повторные калибровки с большой временной паузой, мало повысят стабильность параметров данной системы. В виду этого предлагается метод повторной калибровки диапазона модулирующего напряжения при каждой установке нового частотного диапазона. Суть метода состоит в том, что после получения системой диапазона частот сигнала, модулятор поочередно устанавливает на синтезаторе минимальную частоту и максимальную, при этом петля ФАПЧ подключена и синтезатор функционируют в нормальном режиме. После установки минимальной, а затем и максимальной частоты, аналого-цифровой преобразователь модулятора считывает напряжение на фильтре ФАПЧ, получая тем самым значение минимального и максимального напряжения на ядре ГУН-а, соответствующее минимальной и максимальной частоте сигнала. В данном диапазоне напряжения затем и формируется модулирующий сигнал. После калибровки диапазона напряжений, петля ФАПЧ разрывается, и система переходит в режим работы ГУН-а. Под вышеописанные компоненты была разработана и структурная схема макета, ее вид приведён на рисунке 3.

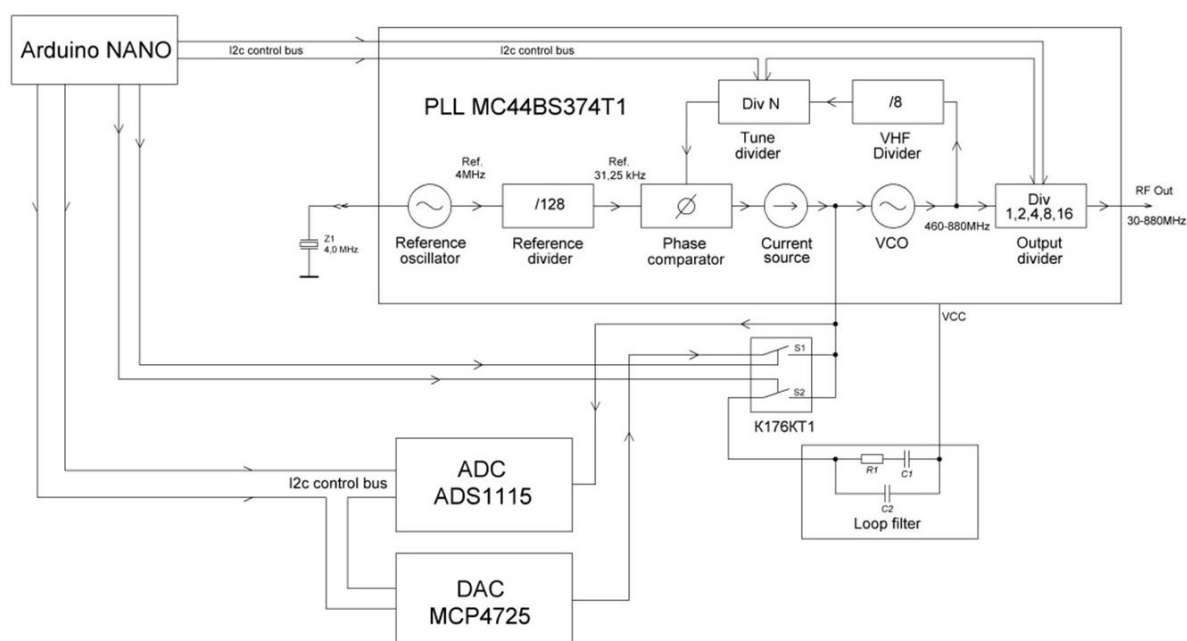


Рис. 3. Структурная схема синтезатора с применением ЦАП и АЦП

Внешний вид разработанного макета приведен на рисунке 4.

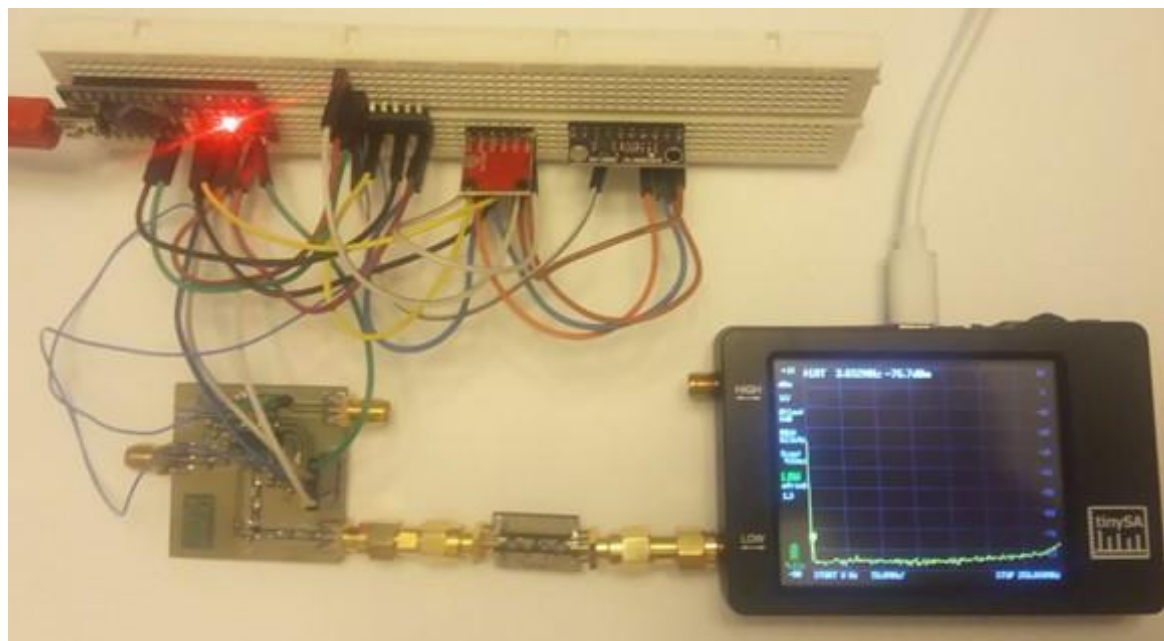


Рис. 4. Внешний вид макета синтезатора

Спектр, полученный посредством разработанного макета приведен на рисунке 5.

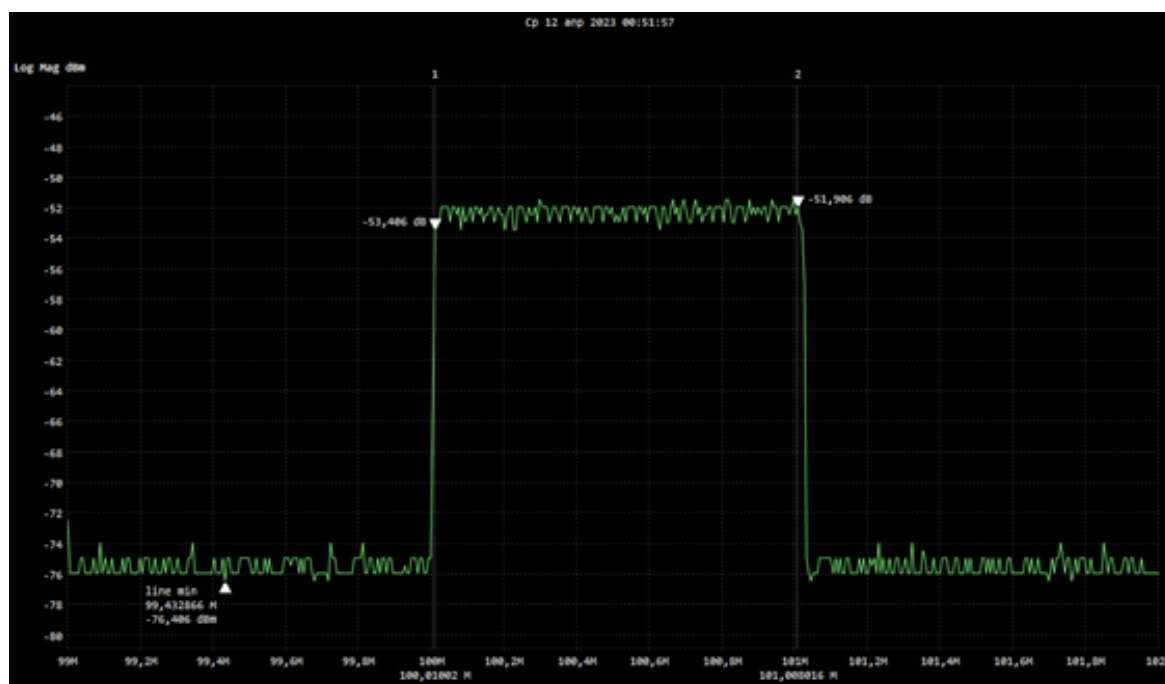


Рис. 5. Спектр сигнала в диапазоне 100-101 МГц

Как видно из представленного спектра, сигнал устанавливается в нужном диапазоне с минимальной ошибкой, а значит применение такого метода формирования возможно как для широкополосных, так и относительно узкополосных сигналов.

Выводы. Данный метод обладает как положительными, так и негативными свойствами цифрового и аналогового метода. Так, например, он медленнее, чем аналоговый метод, поскольку применение такого способа формирования, требует калибровки напряжения ядра минимум в двух точках, но после процесса калибровки, время установки частоты в калиброванном диапазоне соответствует аналоговому методу. Предложенный метод существенно быстрее цифрового, однако обладает пониженной точностью установки частоты, в виду описанных особенностей формирования сигнала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Оценка состояний сети многоканальной радиосвязи в условиях деструктивного воздействия / С. А. Якушенко, А. Н. Забело, В. В. Антонов, С. С. Веркин // Colloquium-Journal. – 2019. – № 23-1(47). – С. 32-35. – DOI 10.24411/2520-6990-2019-10760. – EDN HNOWIN.
2. Подход к оценке усредненной функциональной устойчивости сети многоканальной радиосвязи в условиях воздействия деструктивных факторов / В. К. Снежко, С. А. Якушенко, А. Н. Забело [и др.] // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2022. – № 9-1(72). – С. 69-76. – DOI 10.24412/2500-1000-2022-9-1-69-76. – EDN AGHZMV.
3. Электромагнитные излучения элементов электронной вычислительной техники / Я. И. Рушечников, А. В. Яновский, А. С. Жинкина, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – № 2. – С. 25-35. – EDN TXLBMK.
4. Повышение КПД усилителя класса F3 с учетом влияния выходной емкости активного элемента и активных потерь в нагрузочной цепи / А. П. Ефимович, И. А. Третьяков, Г. В. Мазаев, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2017. – № 3. – С. 106-111. – EDN YNEDCW.
5. Идентификация переходных участков кривой акустических колебаний / В. В. Данилов, И. А. Третьяков, А. В. Шалаев, Я. И. Рушечников // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2018. – № 49. – С. 10-16. – EDN VRKXPS.
6. Третьяков, И. А. Метод расширенного лингвистического описания спектрограмм радиочастот FM-диапазона / И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 1. – С. 14-19. – EDN WLJIAI.
7. Автоматизированный комплекс получения вольт-амперной характеристики полупроводниковых диодов / Я. И. Рушечников, А. В. Яновский, В. Ю. Подлесный, И. И. Худяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 22-27. – EDN NDBPCV.
8. Жинкина, А. С. Уязвимости радиочастотной идентификации в системах безопасности / А. С. Жинкина, К. Г. Джанджгава, И. А. Третьяков // Донецкие чтения 2021: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы VI Международной научной конференции (Донецк, 26-27 октября 2021 г.). – Том 2: Физические и технические науки / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Донецк: Изд-во ДонНУ, 2021. – С. 160-162. – EDN LOKOLH.
9. Curtin, M., Phase-Locked Loops for High-Frequency Receivers and Transmitters – Part 1 / M. Curtin, P. O'Brien // Analog Dialogue. – 1999. – V. 33. – № 5. – P. 9-22.
10. Barrett, C. Fractional/Integer PLL Basics / C. Barrett. – Technical Brief SWRA029, 1999. – 55 p.
11. Голуб, В. Несколько слов о системе ФАПЧ: фазовая автоподстройка частоты / В. Голуб // Компоненты и технологии. – 2003. – № 8(34). – С. 92-96. – EDN MTJZMR.

Поступила в редакцию 05.07.2023 г., рекомендована к печати 26.07.2023 г.

THE METHOD OF FREQUENCY MODULATION IN SYNTHESIZERS WITH A PLL LOOP BREAK

IAnovskii A.V., Tretiakov I.A., Podlesnyi V.IU., Antipov S.S.

In this paper, a technique for the formation of frequency modulation with a break in the loop of phase-locked frequency (PLL) is proposed. The proposed method is significantly faster than digital, but has a reduced accuracy of frequency setting, due to the peculiarities of signal generation.

Keywords: frequency modulation, integral synthesizer, PLL loop.

Яновский Александр Вадимович

заведующий лабораторией кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: alexyana1994@mail.ru

IAnovskii Aleksandr Vadimovich

Head of the laboratory at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, заместитель декана по научной работе, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Deputy Dean for Research, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Подлесный Владимир Юрьевич

заведующий лабораторией кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: pikaayzek@yandex.ru

Podlesnyi Vladimir IUrevich

Head of the laboratory at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Антипов Сергей Сергеевич

магистрант кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: cergey.antipov1210@gmail.com

Antipov Sergei Sergeevich

Master student at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

УДК 621.354.76

МНОГОМОДОВЫЕ ПЕЧАТНЫЕ АНТЕННЫ ДЛЯ НАВИГАЦИИ

© 2023 *Банков С.Е., Давыдов А.Г., Курушин А.А.*

Рассматриваются многомодовые печатные антенны, применяемые для решения задачи помехоподавления при пеленгации цели и спутниковой навигации. Антенны позволяют формировать диаграмму направленности, имеющую нуль, направляемый на источник помехи, с помощью изменения фаз сигналов возбуждения, подаваемых на отдельные входы многомодовой антенны. Рассматриваются вопросы согласования таких антенн для синфазного и противифазного возбуждения.

Ключевые слова: многомодовые антенны, навигация, GPS, GLONASS, помехоподавление, многопортовые СВЧ устройства, программа ANSYS HFSS.

Введение. Задачи помехоподавления и фазовой пеленгации приобретают особую актуальность в связи с развитием систем спутниковой навигации [1]. Обычно данные задачи решаются при помощи антенных решеток, содержащих, как правило, не менее трех антенн, в качестве которых чаще всего используют печатные антенны. Поскольку расстояние между антеннами выгодно выбирать примерно равным половине длины волны в свободном пространстве, то подобные системы в дециметровом диапазоне имеют во многих случаях большие габаритные размеры. Уменьшение размеров может быть достигнуто за счет применения антенн специального типа – многомодовых печатных антенн (МПА), в которых одинаковые резонансные частоты имеют не менее трех собственных колебаний с ортогональными диаграммами направленности (ДН).

Печатные антенны, в том числе одиночные излучатели и решетки, нашли широкое применение в различных радиоэлектронных системах. К числу их достоинств относятся малые габариты, высокая технологичность и низкая стоимость, надежность и т.д. В простейшей печатной антенне имеется слой диэлектрика, на поверхности которого нанесены металлические проводники [1]. Один из них полностью покрывает поверхность диэлектрического слоя, а другой может иметь более сложную форму. Как правило, диэлектрический и металлические слои имеют прямоугольную или круглую форму. Связь такой антенны с внешними устройствами обеспечивается с помощью элемента возбуждения, например центрального проводника коаксиального кабеля, центральный проводник которого соединен с полосковым проводником, а внешняя оплетка – с экраном.

Многомодовые антенны с различным числом элементов возбуждения. Печатные антенны могут быть созданы как антенны с линейной поляризацией, последние могут иметь форму круга [2] или квадрата [3] или близкую к ним. Точный выбор формы зависит от числа элементов возбуждения, которые используются для связи с внешней схемой. Если антенна имеет один элемент связи, то форма антенны, то есть форма полоскового проводника, близка к квадрату или кругу, но не совпадает с ними полностью. При использовании двух элементов связи антенна имеет строго круглую или квадратную форму (рис. 1).

В системах пеленгации, а в последнее время и в системах с помехоподавлением применяются антенны, имеющие несколько входов (портов). При этом каждому входу или комбинации входов соответствует своя диаграмма направленности (ДН) излучения антенны.

Наибольшее распространение получили суммарные и разностные ДН, при помощи, которых решаются такие задачи как определение направления принимаемого сигнала (пеленгация) и формирование нуля ДН в заданном направлении (помехоподавление).

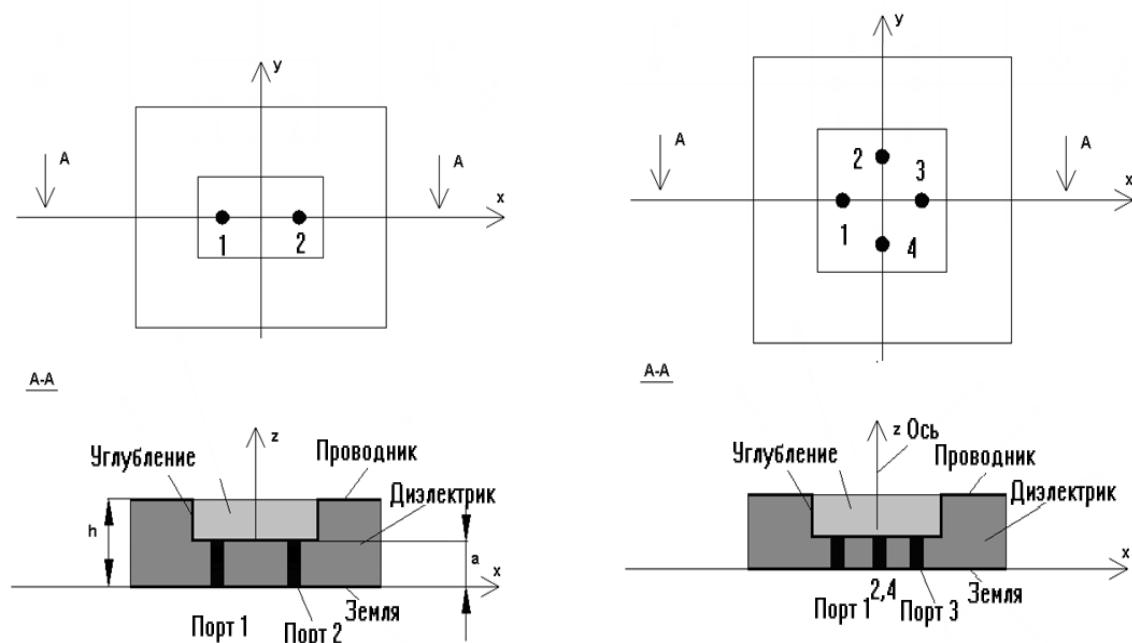


Рис. 1. Планарные антенны с четным числом элементов возбуждения

Печатные и вибраторные антенны относятся к резонансным антеннам, в которых излучение формируется путем возбуждения собственных колебаний - мод объемного резонатора. Поэтому резонансные многопортовые антенны получили название многомодовых антенн.

В МПА, описанной в работе [4] используются три собственных колебания. Два колебания принято называть основными. Они формируют две суммарные ДН, имеющие максимум излучения вдоль оси печатной антенны. При этом указанные ДН отличаются поляризацией излучения. Третье колебание получило название конденсаторного. Ему соответствует разностная ДН с нулем излучения вдоль указанной оси. Конденсаторное колебание является аналогом колебания параллельного контура. Роль ёмкости играют проводники печатной антенны, а роль индуктивности металлические штыри, которые часто выполняют функцию элементов возбуждения антенны.

На рис. 2 показана модифицированная конструкция МПА, в которой преодолевается ряд недостатков антенны [4]. МПА содержит диэлектрическую пластину, экран и полосковый проводник, которые расположены соответственно на нижней и верхней поверхностях диэлектрической пластины и три элемента возбуждения.

Рассмотрим функционирование многомодовой печатной антенны. Поскольку антенна является взаимным устройством, то её можно рассматривать, как в передающем, так и в приемном режимах. В приемном режиме антенна возбуждается плоской волной свободного пространства, которая падает на нее под произвольными углами падения θ, φ , где θ - угол места, φ - азимутальный угол.

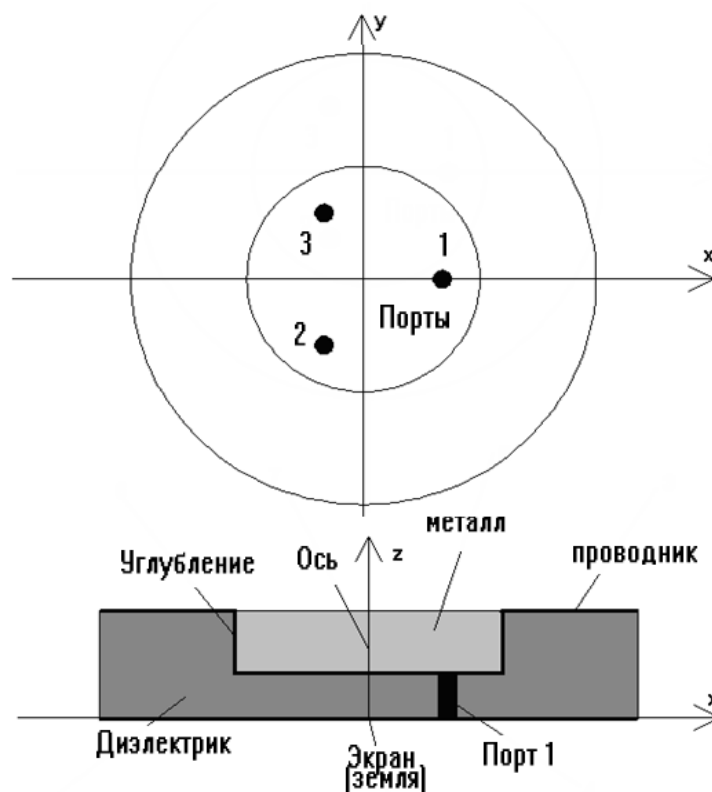


Рис. 2. Трехпортовая антенна-резонатор для навигации

Многомодовая печатная антенна представляет собой объемный резонатор. Объемный резонатор характеризуется спектром собственных колебаний. Каждое колебание описывается распределением поля $\vec{e}_n(x, y, z)$, $\vec{h}_n(x, y, z)$ и резонансной частотой f_{rn} , где n - номер колебания.

Для работы в качестве многомодовой антенны два и больше собственных колебания резонатора должны быть настроены на одну частоту, то есть иметь одинаковые или, по крайней мере, близкие резонансные частоты.

Рассмотрим простейшую многомодовую печатную антенну с двумя собственными колебаниями, имеющими одинаковые частоты (рис. 1).

Пусть на эту антенну падает волна в плоскости XOY, то есть её азимутальный угол $\varphi = 0$. Распределения векторов электрического $\vec{E}_i$ и магнитного $\vec{H}_i$ полей падающей волны в пространстве описываются экспоненциальной функцией:

$$\begin{Bmatrix} \vec{E}_i \\ \vec{H}_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \vec{e}_i \\ \vec{h}_i \end{Bmatrix} e^{ikx \sin \theta + ikz \cos \theta},$$

где $\vec{e}_i, \vec{h}_i$ - амплитуды компонент поля, k - волновое число свободного пространства.

Поле падающей волны возбуждает оба основных колебания одновременно. Коэффициент возбуждения колебания пропорционален интенсивности поля падающей волны при $z = 0$, $y = 0$, $x = \pm a/2$, где a - размер многомодовой печатной антенны по оси Ox [6]. Тогда компоненту E_z поля в многомодовой печатной антенне можно записать следующим образом:

$$E_z = Ke_{z1}(x, y, z)h_{yi} \left(u_1(a/2)e^{ik\frac{a}{2}\sin\theta} - u_1(-a/2)e^{-ik\frac{a}{2}\sin\theta} \right) + \\ + Ke_{z2}(x, y, z)h_{yi} \left(u_2(a/2)e^{ik\frac{a}{2}\sin\theta} - u_2(-a/2)e^{-ik\frac{a}{2}\sin\theta} \right), \quad (1)$$

где $u_n(\pm a/2)$ - средние напряжения поля n - го собственного колебания на краях металлического экрана и полоскового проводника при $x = \pm a/2$:

$$u_n(\pm a/2) = \int_{-b/2}^{b/2} \int_0^h e_{zn}(\pm a/2, y, z) dy dz,$$

где b - размер многомодовой печатной антенны по оси Oy , K - постоянный множитель, который определяется конкретной структурой антенны, h_{yi} - амплитуда H_y компоненты магнитного поля падающей волны.

В силу симметрии полей собственных колебаний соотношение (1) можно упростить:

$$E_z = K_1 e_{z1}(x, y, z) \cos\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\right) + K_2 e_{z2}(x, y, z) \sin\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\right), \quad (2)$$

где $K_{1,2}$ - постоянные комплексные коэффициенты.

Отметим, что поле между двух металлических плоскостей, параллельных плоскости HOY не зависит от координаты Z . По этой причине поле собственных колебаний также практически не зависит от координаты Z за исключением небольшой области вблизи границы углубления. Поэтому далее можно из аргументов функций $e_{zn}(x, y, z)$ исключить переменную Z .

Поле собственных колебаний наводит на элементах возбуждения (2) электрические токи, которые, в свою очередь, возбуждают на выходах многомодовой печатной антенны сигналы, которые пропорциональны указанным токам. Так как элементы возбуждения расположены симметрично относительно начала координат и расстояние между ними равно l , то напряжения выходных сигналов $U_{1,2}$ можно записать следующим образом:

$$U_1 = T_{1,1} \cos\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\right) + T_{1,2} \sin\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\right), \\ U_2 = T_{2,1} \cos\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\right) + T_{2,2} \sin\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\right) \quad (3)$$

где $T_{1,1} = K_1 e_{z1}\left(-\frac{l}{2}, 0\right)$ и $T_{2,1} = -T_{1,1}, T_{2,2} = T_{1,2}$ - коэффициенты передачи между типами волн.

В современных цифровых системах сигналы с выходов многомодовой печатной антенны после переноса частоты с СВЧ на промежуточную частоту могут быть

оцифрованы и переданы в ЭВМ, которая может выполнять любые математические операции с поступившими в нее сигналами. В этом случае ДН формируется цифровым образом.

Из соотношений (3) видно, что складывая сигналы $U_{1,2}$ мы получаем сигнал, имеющий нечетную зависимость V_1 от угла θ с нулем при $\theta = 0$, а вычитая сигналы $U_{1,2}$, получаем четную зависимость V_2 :

$$V_1 = 2T_{1,2} \sin\left(k \frac{a}{2} \sin \theta\right), \quad V_2 = 2T_{1,1} \cos\left(k \frac{a}{2} \sin \theta\right).$$

Формируя линейные комбинации сигналов $V_{1,2}$, возможно создание ДН, имеющей нуль в направлении, которое задается углом θ_0 . Для этого достаточно сложить указанные сигналы с определенными $q_{1,2}$:

$$F(\theta) = q_1 V_1 + q_2 V_2,$$

$$\text{где } q_1 = \frac{\cos\left(k \frac{a}{2} \sin \theta_0\right)}{T_{1,2}}, \quad q_2 = -\frac{\sin\left(k \frac{a}{2} \sin \theta_0\right)}{T_{1,1}}.$$

Таким образом, видим, что при помощи многомодовой печатной антенны может быть решена задача подавления помех от сосредоточенных в пространстве источников за счет формирования нулей ДН.

Важным для нормальной работы многомодовой печатной антенны фактором является настройка всех рабочих колебаний на одну частоту. В традиционной печатной антенне, также возможен многомодовый режим. Для этого наряду с колебанием, которое принято называть основным, необходимо использовать дополнительное колебание, получившее название конденсаторного. Основное колебание является аналогом колебания с $n=1$ с нечетной зависимостью от координаты x . Конденсаторное колебание аналогично колебанию с $n=2$. Оно имеет четную зависимость электрического поля от x .

Недостатком конденсаторного колебания является невозможность независимой настройки его резонансной частоты на рабочую частоту многомодовой печатной антенны. В известной многомодовой антенне [5] настройка колебания аналогичного конденсаторному осуществляется за счет выбора длины металлического штыря, которая близка к четверти длины волны в свободном пространстве. Отметим, что в силу того, что функция $e_{z1}(x)$ является нечетной, то она имеет нуль в точке $x=0$. Следовательно, любые изменения конструкции антенны в центральной части, влияющие преимущественно на электрическое поле не сказываются на основном колебании с $n=1$ и, наоборот, сильно влияют на конденсаторное колебание с $n=2$.

Отметим, что настройка многомодовой печатной антенны не приводит к увеличению добротности её колебаний и, следовательно, к сужению полосы рабочих частот. Добротность колебания определяется высотой антенны на её краях, с которых происходит излучение в свободное пространство. Поэтому простое уменьшение толщины диэлектрической пластины может увеличить емкость между полосковым проводником и металлическим экраном и обеспечить настройку резонансных частот

собственных колебаний. Однако, при этом неизбежен рост добротности и уменьшение полосы устройства из-за ухудшения излучающей способности антенны. Уменьшение зазора между металлическими проводниками в центральной части многомодовой печатной антенны позволяет устранить указанный выше недостаток за счет того, что её высота в излучающей области остается неизменной.

Моделирование многомодовой печатной антенны выполнено при помощи системы электродинамического моделирования ANSYS HFSS, которая является общепризнанным средством для проведения численных экспериментов. Данная система обеспечивает высокую точность расчетов и их хорошее совпадение с экспериментальными результатами. В ходе численных расчетов определялись виртуальные ДН, образованные линейными комбинациями выходных сигналов $U_{1,2,3}$. Линейные комбинации, дающие напряжения $V_{1,2,3}$ формировались следующим образом:

$$\begin{aligned} V_1 &= U_1 + U_2 e^{2i\pi/3} + U_3 e^{4i\pi/3}, \\ V_2 &= U_1 + U_2 e^{-2i\pi/3} + U_3 e^{-4i\pi/3}, \\ V_3 &= U_1 + U_2 + U_3. \end{aligned}$$

Напряжения $V_{1,2}$ имеют одинаковые зависимости от углов падения плоской волны. Они отличаются только поляризацией принимаемого излучения. Напряжение V_1 соответствует правой круговой поляризации, а V_2 - левой круговой. Обе ДН имеют максимумы в направлении $\theta = 0$. Зависимость от углов θ, φ напряжения V_3 дает нам ДН с нулем при $\theta = 0$.

Такие формы полученных характеристик излучения подтверждают возможность подавления помехи при помощи такой многомодовой печатной антенны.

Электродинамическое моделирование МПА. Создание и оптимизация реальной трехпортовой антенны начиналось с анализа простейшей конструкции пач-антенны, которая излучала в окружающее пространство электромагнитные поля, диаграммы направленности которых различаются в случае синфазного (углы по 0°) и фазированного (углы сигналов возбуждения сдвинуты на 120°) так, чтобы можно было бы формировать ДН с провалами в определенные точки пространства при возбуждении портов с произвольными фазовыми углами. Были выбраны толщина и параметры подложки. Затем оставшиеся переменные настраивались так, чтобы перестроить антенну на частоту GPS 1.59 ГГц. Изменение структуры: увеличение толщины патрона, изменение диаметра внешней антенны и внутреннего выреза, и др. действия приводят к тому, что изменяются виды частотных характеристик для суммарного и фазированного вида колебаний, которые находятся с помощью суммирования сигналов на каждом порту с учетом всех других наведенных сигналов с соответствующими фазами колебаний.

Разнос частот для разных типов возбуждения объясняется тем, что имеется взаимная связь между портами, характеризующаяся элементами матрицы рассеяния S_{12} , S_{13} , S_{23} . Коэффициенты отражения, с учетом связи соседних портов, рассчитываются по формулам возбуждения $S_{11_corr} = S_{11} + 2 \cdot S_{12}$, для синфазного возбуждения, и $S_{11_corr} = S_{11} - S_{12}$ для противофазного возбуждения.

Именно из-за того, что скорректированное значение коэффициента отражения включает комплексное число коэффициента связи S_{12} наблюдается то, что минимум коэффициента отражения достигается не в той точке, когда имеется минимум S_{11} . Эти формулы получены следующим образом. Рассматривая отраженные волны на первом порту, с учетом синфазного возбуждения на всех портах, имеем:

$$S_{11_синфазн} = S_{11} \cdot e^{j0} + S_{12}e^{j0} + S_{13}e^{j0} = S_{11} + 2S_{12},$$

$$S_{11_фазированн} = S_{11} \cdot e^{j0} + S_{12}e^{j120} + S_{13}e^{j240} = S_{11} - S_{12}.$$

Используя эти скорректированные параметры, можно рассчитать частотные характеристики КСВ с учетом связи между портами.

В результате подстройки антенны МТА, настроенной на центральную частоту 1.59 ГГц получены частотные характеристики КСВ для синфазного и фазированного возбуждения, показанные на рис. 3. Из них можно видеть, что полосы частот в этих случаях возбуждения разные.

Для цели настройки МПА нужно найти такие подстроечные элементы, которые одновременно перестраивали бы частоту и для синфазного, и для фазированного возбуждения. Однако это можно было бы получить только в том случае, если бы отсутствовала связь между элементами возбуждения.

Расчеты показали, что лучше всего перестраивать ЧХ одновременно по обоим колебаниям, ставивая внешний диаметр диэлектрического цилиндра.

Изменение расстояния между портами, что является следствием смещения портов от центра, изменяет ЧХ элементов связи S_{12} . Однако модуль S_{12} имеет небольшую величину, поэтому резонансная частота почти не меняется. Ток на поверхности резонаторной части антенны (рис. 2) показывает, что связь между портами значительно не изменяется при смещении точек портов от центра.

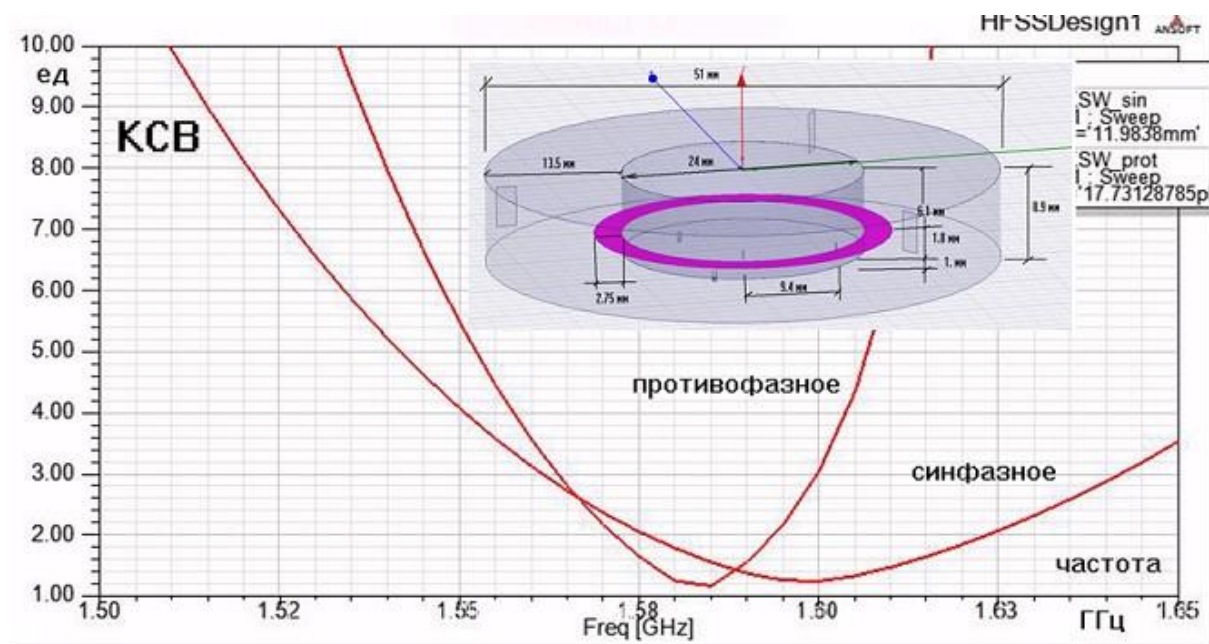


Рис. 3. Частотные характеристики круглой трехпортовой МПА для синфазного и противофазного возбуждения

Рассчитаем суммарную (синфазную) ДН, а также ДН при противофазном возбуждении портов (рис. 4). Поле в дальней зоне r_{Total} пропорционально КНД антенны.

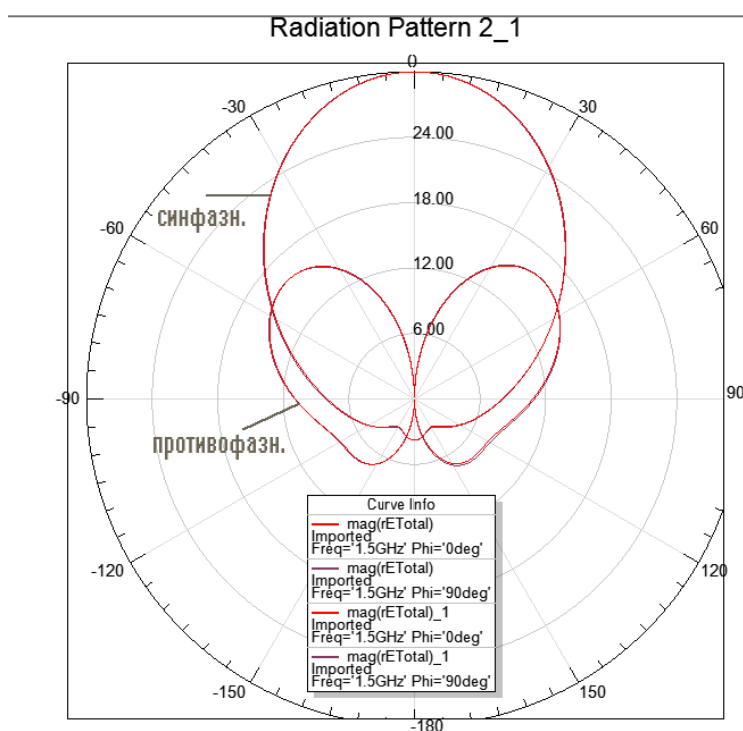


Рис. 4. Сечения диаграммы направленности в полярной системе координат при синфазном возбуждении (углы 0, 120° и 240°) – светит вверх, и противофазном возбуждении (яблоко), углы (0, 0, 0)

Реальная конструкция многомодовой трехпортовой антенны показана на рис. 5, а измеренные частотные характеристики КСВ портов – на рис. 6.

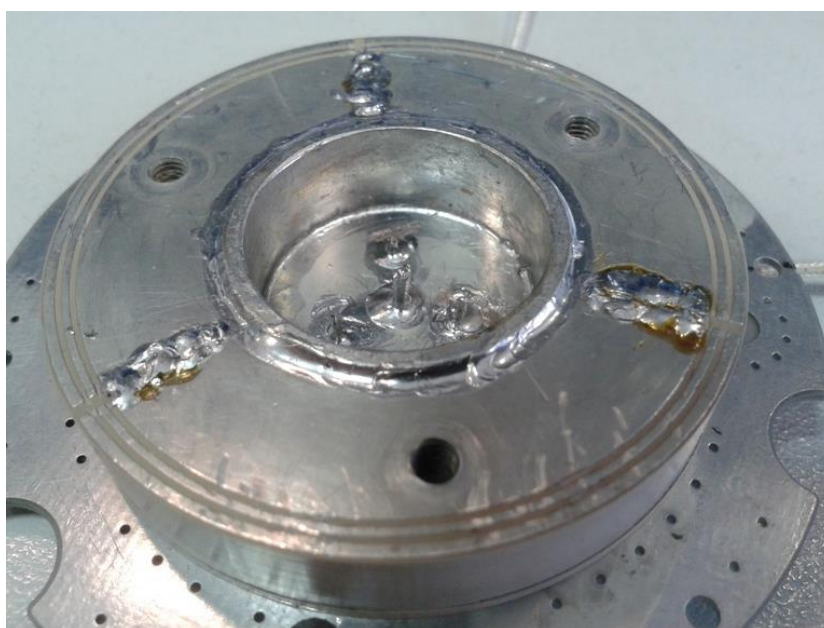


Рис. 5. Внешний вид трехпортовой многомодовой антенны с элементами подстройки (три перемычки под углом 120°)

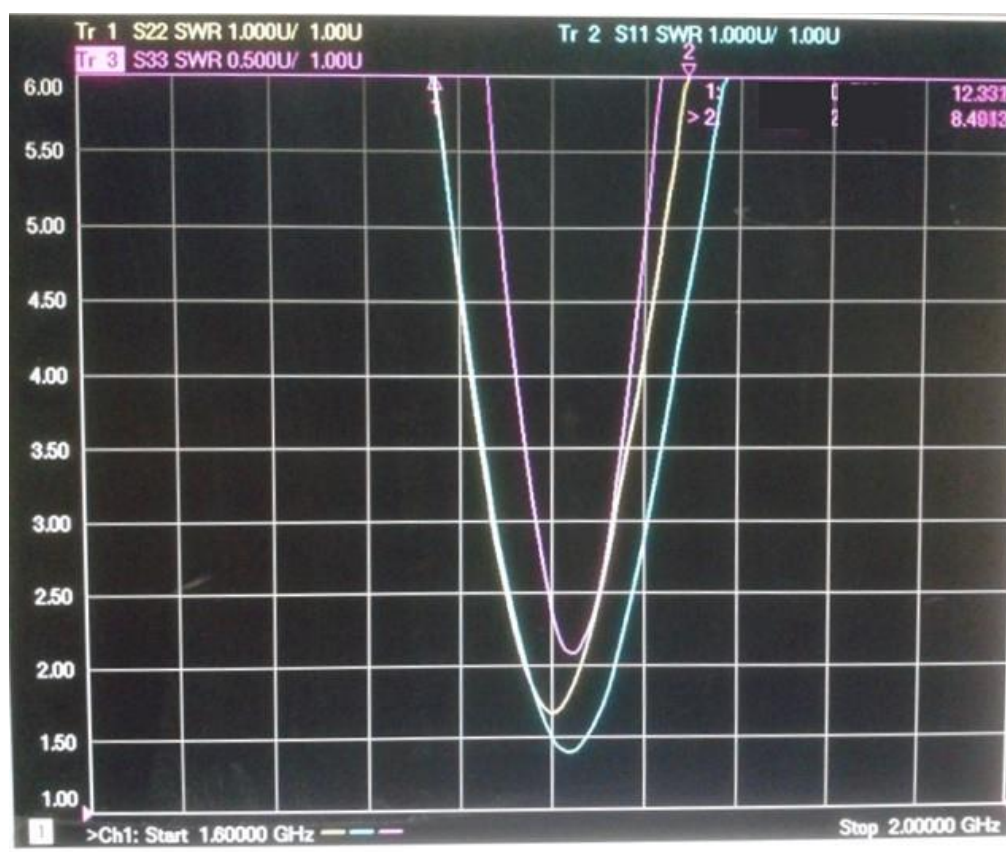


Рис. 6. Частотные характеристики КСВ на трех портах трехпортовой антенны

Экспериментальные исследования показали, что по уровню - 3 дБ модуля коэффициента отражения, рабочая полоса частот изменяется в пределах от 45 МГц до 60 МГц, при изменении элементов подстройки (рис. 5, рис. 6).

Выводы. Рассмотренные антенны могут быть применены в качестве навигационных антенн, и, при условии цифровой обработки сигналов, принимаемых со входов антенн, могут использоваться как антенны с изменяемой пространственной диаграммой направленности, а также служить для подавления сосредоточенных в пространстве помех путем адаптивного формирования нулей ДН. Антенна с тремя входами исследована наиболее разносторонне, при небольших габаритных размерах она имеет хорошее согласование в полосе частот до 3%.

В результате анализа конкретной конструкции трехпортовой антенны было найдено, что согласование нужно вести по скорректированным параметрам рассеяния, с учетом связи между портами. Эти формулы были получены и использовались при оптимизации антенны для согласования. Наилучшие результаты согласования согласно численной оптимизации получены при внесении внешней подстроечной шляпки, и в этом случае согласование по синфазному и фазированному возбуждению равны около $K_{CB}=1.2$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Haddrell, T. Realizable GPS antennas for integrated hand held products / T. Haddrell, J. P. Bickerstaff, M. Phocas // In 18th International Technical Meeting of the Satellite Division (ION GNSS 2005). – Long Beach, CA: The Institute of Navigation, 2005. – P. 679-689.

2. Wood, C. Analysis of microstrip circular patch antenna / C. Wood // Proc. IEEE AP. – 1981. – V. 128. – № 2. – P. 69.
3. Waterhouse, R. Small microstrip patch antenna / R. Waterhouse // Electronics Letter. – 1995. – V.31. – №4. – P. 604-605.
4. Банков, С. Е. Антенны спутниковых навигаторов / С. Е. Банков. – М.: Изд-во «Перо», 2014. – 693 с.
5. United States Patent №5523761 USA. Differential GPS smart antenna: published 4.06.1996 / David R. Gildea ; assignee: Trimble Navigation Limited.
6. Панченко, Б. А. Микрополосковые антенны / Б. А. Панченко, Е. И. Нефедов. – М.: Радио и связь, 1986. – 144 с.
7. Misra, P. Global positioning system: Signals, measurements, and performance / P. Misra, P. Enge. – Ganga-Jamuna Press, Lincoln, MA, 2006. – 569 pp.
8. Банков, С. Е. Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS / С. Е. Банков, Э. М. Гутцайт, А. А. Курушин. – М.: Оркада, 2012. – 250 с.
9. Патент № 2597957 C1 Российская Федерация, МПК H01Q 9/04. Многомодовая печатная антенна : № 2015115055/28 : заявл. 22.04.2015 : опубл. 20.09.2016 / С. Е. Банков, А. Г. Давыдов, А. Г. Курушин ; заявитель ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "МОСКОВСКОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО "КОМПАС". – EDN PHEDFR.

Поступила в редакцию 18.07.2023 г., рекомендована к печати 04.08.2023 г.

MULTIMODE ANTENNAS FOR NAVIGATION

Bankov S.E., Davydov A.G., Kurushin A.A.

In paper are considered multimode printed antennas for satellite navigation used to solve the problem of noise reduction in target direction. Antennas allow to form a radiation pattern having zero in directed to the noise source by changing the phases of the excitation signals supplied to the individual inputs of a multimode antenna. The issues of matching such antennas for co-phase and anti-phase excitation are considered.

Keywords: multimode antennas, navigation, GPS, GLONASS, reduce interference and noise, multiport microwave devices, ANSYS HFSS program.

Банков Сергей Евгеньевич

доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук», Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: sbankov@yandex.ru

Bankov Sergei Evgenevich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher of V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Moscow.

Давыдов Александр Георгиевич

кандидат технических наук, начальник отдела АО «АП Восход», Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: alexanderdavydov@mail.ru

Davydov Aleksandr Georgievich

Candidate of Technical Sciences, Head of Department «AP Voskhod », Russian Federation, Moscow.

Курушин Александр Александрович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры радиотехнических приборов и антенных систем ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"», Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: kurushin@mail.ru

Kurushin Aleksandr Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor of Moscow Power Engineering Institute, Russian Federation, Moscow.

УДК 536.244

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЕГО ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

© 2023 Пометун Е.Д.

В данной работе описано влияние искусственной загрязненности термистора, использующегося в качестве чувствительного элемента датчика термометра, на его динамические параметры. Приведены динамические характеристики термистора в режиме работы термометра при различной и толщине слоя загрязненности оболочки и скоростях обтекания датчика.

Ключевые слова: термистор, датчик температуры, загрязненность, динамические характеристики.

Введение. Одними из наиболее инерционных звеньев системы управления, как правило, являются первичные преобразователи физических величин в электрические сигналы. Определение динамических характеристик первичного преобразователя в динамических условиях является актуальной задачей, позволяющей оптимизировать технологические процессы и алгоритмы управления сложными объектами [1].

Широкое использование термисторов в качестве первичных измерительных преобразователей температуры в различных областях науки, техники объясняется их большим температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), малой инерционностью и сравнительно низкой стоимостью. К недостаткам можно отнести: нелинейность температурной зависимости сопротивления и отсутствие взаимозаменяемости из-за большого разброса номинального сопротивления и ТКС [2].

Основная часть. Методы и средства измерения мгновенных значений тепловых параметров газовых потоков имеют большое значение в управлении различными технологическими процессами, а так же в научных исследованиях и в промышленности. Одними из широко распространённых измерительных преобразователей температуры являются термисторы.

В реальных условиях эксплуатации термометра в научных исследованиях и промышленности чувствительный элемент зачастую находится в загрязненном потоке, в котором присутствует пыль и другие вещества, оседающие на теплоотдающую поверхность датчика.

Эксплуатация термометра в оборудовании, в котором затруднено или вовсе невозможно выполнить чистку или обеспечить чистоту среды использования, приводит к постепенному загрязнению оболочки датчика. В свою очередь, загрязнение чувствительного элемента приводит к возникновению погрешности измерений и изменению частотной характеристики термометра, вследствие увеличения объема чувствительного элемента [3].

В данной работе, датчик термометра представляет собой стеклянный цилиндр с расположенными в нем чувствительным элементом (ЧЭ) и токопроводящими проводами типа Ерсос G550 (рис. 1). ЧЭ нагрет до постоянной температуры 120⁰С и прогревает провода и стеклянную оболочку [4].

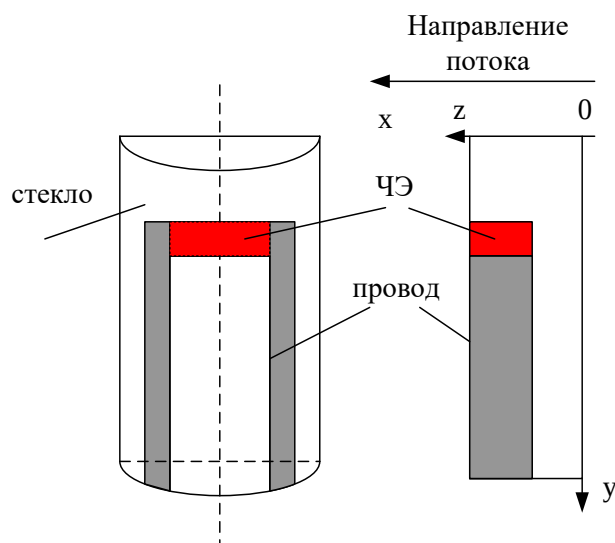


Рис. 1. Графическое представление чувствительного элемента (стеклянного термистора) датчика термометра

Теплофизические процессы в системе датчик – провод – стекло – окружающая среда, описываются уравнением теплопереноса соответствующими краевыми условиями [4]. Загрязненность поверхности ЧЭ увеличивает термическое сопротивление теплопередающей стенки и, следовательно, снижает коэффициент теплопередачи аппарата.

Теплофизические процессы в системе датчик – провод – стекло – окружающая среда, описываются уравнением теплопереноса:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} a \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} a \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} a \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (1)$$

где T – текущая температура, t – текущее время, x, y, z – текущие координаты, a – коэффициент температуропроводности, который меняется от вида материала: для стекла a_c , для датчика a_d и для провода a_n .

Экспериментальные исследования динамических характеристик термометра с термистором Ersos G550 выполнялись на малом аэродинамическом стенде, приведенном на рисунке 2. Принцип работы и его технические характеристики приведены в работе [5, 6].

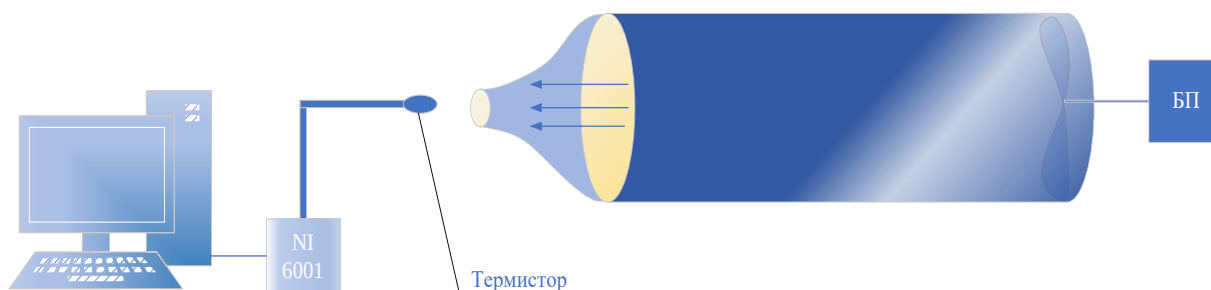


Рис. 2. Внешний вид малого аэродинамического стенда

Физическое моделирование загрязнения чувствительного элемента датчика термометра выполнялось путем нанесения на стеклянную оболочку лакового покрытия (основа состава лака: тосиламидформальдегидная смола и ацетобутират целлюлозы).

Было выполнено три серии измерений постоянной времени датчика. В первой серии были получены частотные характеристики чистого чувствительного элемента, во второй – нанесен один слой лакового покрытия, в третьей – два слоя покрытия. Диаметр чистого термистора составлял 1,3 мм. После покрытия оболочки термистора одним слоем лака диаметр его составил 1,5 мм (загрязнение составило $\approx 0,2$ мм), после нанесения еще одного слоя лака – диаметр составил 1,7 мм, что соответствует $\approx 0,4$ мм. В исходном состоянии термистор был нагрет до 120°C и по команде оператора охлаждался до комнатной температуры. Пример полученной переходной характеристики приведен на рисунке 3.

Для преобразования, аналогового выходного сигнала термометра в цифровой код, предварительной обработки и хранения полученных данных использовалось оборудование фирмы National Instruments, состоящее из блока сбора данных и АЦП, типа USB-NI 6001. Для выполнения измерений использовалось программное обеспечение (ПО) LabVIEW Signal Express, с помощью которого была создана, адаптированная под конкретную задачу, виртуальная лаборатория. Окно программы представлено на рисунке 3.

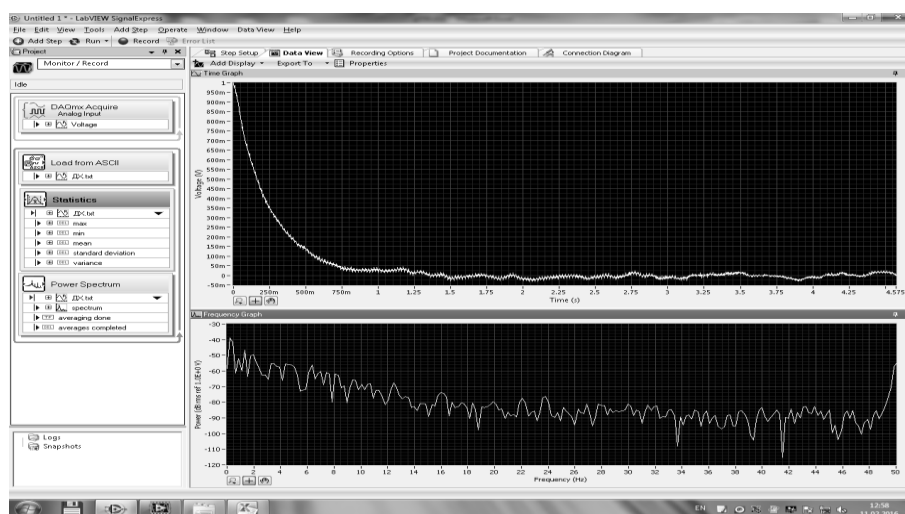


Рис. 3. Окно виртуальной лаборатории LabVIEW Signal Express

Для преобразования аналогового сигнала были выбраны следующие параметры АЦП: частота опроса 10 кГц, время опроса 3 с, т.е. 30000 измерений за цикл перемещения датчика. Полученные данные транспонировались в программу Excel, где проводилась окончательная обработка данных, включая, построение графиков и определение постоянной времени.

Расчет температуры выполнялся по формуле [7]:

$$T = \frac{B \cdot T_0}{B + T_0 \cdot \ln\left(\frac{R_t}{R_0}\right)} - 273,15, \quad (2)$$

где B – градуировочный коэффициент, T – температура, R_0 – сопротивление термистора при T_0 , R_t – сопротивление термистора при текущей температуре, T_0 – номинальная температура (25°C).

Коэффициент B рассчитывается по формуле:

$$B = \frac{T_0 \cdot T}{T_0 + T} \cdot \ln \left(\frac{R_t}{R_0} \right), \quad (3)$$

По полученным данным B вычислялись средние значения и по ним с помощью (2) вычислялась измеренная температура. Таким образом, получены два значения температуры: расчетное и измеренное. Данная методика была разработана в СКТБ «Турбулентность» и широко использовалась на практике.

Далее, полученная переходная характеристика $\tau = f(V)$ нормировалась в соответствии с ГОСТ 8.009 - 84.

Зависимости постоянной времени термистора от скорости обтекания ЧЭ $\tau = f(V)$, приведены на рисунке 4.

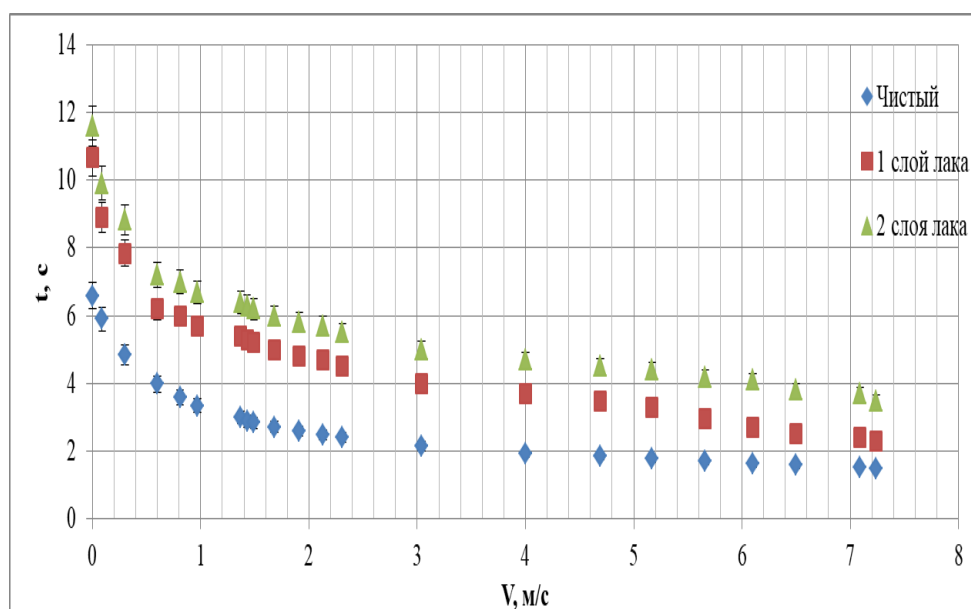


Рис. 4. Зависимости $\tau = f(V)$ термистора G550, в режиме термометра

Т.о., из графика (рис. 4) видно, что при отсутствии скорости обтекания датчика, величина постоянной времени термистора максимальна и составляет 6,5 с ÷ 11,2 с в зависимости от толщины загрязненности оболочки. С увеличением скорости газового потока постоянная времени уменьшается и в диапазоне 4 м/с ÷ 7,5 м/с практически не изменяется как чистого, так загрязненного термисторов. Однако загрязненность оболочки термистора сильно влияет на инерционность датчика термометра, что может привести к нарушению технологического процесса или вовсе к критическому режиму работы АСУ.

Величина постоянной времени термистора с одним слоем лака при $V=0$ в 1,5 раза больше постоянной времени чистого термистора. С увеличением толщины загрязнения постоянная времени увеличилась примерно в 0,2 раза по отношению к величине постоянной времени термистора с одним слоем загрязнения.

Выводы. На основании полученных результатов можно сделать заключение, что загрязненность оболочки сильно влияет на динамические параметры датчика термометра, с остеклованным термистором в качестве чувствительного элемента. Для контроля работоспособности АСУ, в состав которой входит термометр на основе термистора, необходимо выполнять измерения постоянной времени датчика при известных параметрах внешних условий (скорости обтекания датчика).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пометун, Е. Д. Разработка автоматизированной системы научных исследований для аэродинамического эксперимента / Е. Д. Пометун, Р. А. Хрипунов, А. В. Васильева // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2020. – №1. – С. 4–8.
2. Детюк, Д. Е. Оптимизация аппроксимирующей функции градуировочной характеристики термистора / Д. Е. Детюк, А. А. Левченко // Вестник студенческого научного общества ГОУ ВПО "Донецкий национальный университет". – 2018. – Т. 1, № 10. – С. 98–102.
3. Михеев, Н. И. Термоанемометрические измерения при загрязнении нити датчика / Н. И. Михеев, Д. В. Кратиров, А. В. Саховский, К. Р. Хайрмасов // Модели и методы аэродинамики : Материалы Восьмой Международной школы-семинара, Евпатория, 04–13 июня 2008 года. – Евпатория: МЦНМО, 2008. – С. 110–111.
4. Пометун, Е. Д. Исследование динамических характеристик термометра на основе NTC–термистора / Пометун Е. Д., Белоусов В. В., Болонов Н. И., Лебедев В. Н. // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – №1. – С. 4–13.
5. Пометун, Е. Д. Экспериментальные стенды для исследования динамических характеристик измерительных преобразователей температуры / Е. Д. Пометун, Н. И. Болонов, В. Н. Лебедев // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2018. – № 1. – С. 4–12.
6. Кузнецов, Д. Н. Электронная система малого аэродинамического стенда градуировки и исследований импульсных термоанемометров / Д. Н. Кузнецов, В. Н. Лебедев, А. Н. Левченко // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: Вычислительная техника и автоматизация. – 2010. – № 19(171). – С. 111–117.
7. Кузнецов, Д. Н. Исследование некоторых функций аналитического описания экспериментальных градуировочных характеристик термисторов / Д. Н. Кузнецов, В. Н. Лебедев, Ю. Д. Украинский // Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы : Материалы восьмого научно-практического семинара: в 3-х томах (Донецк, 17–20 апреля 2007 г.) / Южный федеральный университет; Донецкий национальный технический университет. Том 3. – Донецк: ДонНТУ, 2007. – С.104–108.

Поступила в редакцию 06.09.2023 г., рекомендована к печати 20.09.2023 г.

EFFECT OF TEMPERATURE SENSOR CONTAMINATION ON ITS DYNAMIC PARAMETERS

Pometun E.D.

This paper describes the effect of artificial contamination of a thermistor used as a sensor of a thermometer on its dynamic parameters. The thermistor dynamic characteristics are given in the thermometer operation mode at different and thickness of the cladding contamination layer and sensor flow rates.

Keywords: thermistor, temperature sensor, contamination, dynamic characteristics.

Пометун Екатерина Дмитриевна

кандидат технических наук, доцент кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: alternativa19031992@rambler.ru

Pometun Ekaterina Dmitrievna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 536.7:004.942

РАСПОЗНАВАНИЕ В АЛГЕБРАХ КЛИНИ НА ИДЕМПОТЕНТНЫХ ПОЛУКОЛЬЦАХ

© 2023 Максименко И.И., Котенко В.Н.

В данной работе введены понятия представления, фрагмента, кофрагмента и точного кофрагмента для алгебр Клини на идемпотентных полукольцах общего вида. В терминах специального метрического пространства сформулирован критерий финитности представлений. Исследованы алгебраические свойства и условия существования представлений как для алгебр Клини общего вида, так и для специальных алгебр Клини.

Ключевые слова: неструктурированный объект, представление, фрагмент, кофрагмент, точное представление, алгебра Клини, идемпотентное замкнутое полукольцо.

Введение. Одной из центральных проблем теории дискретных систем является задача идентификации объекта (автомата, взвешенного графа, языка) из заданного класса объектов на основе проведения с ним различных видов экспериментов. В работах [1-3] впервые был введен и обоснован подход к исследованию контрольных и распознающих экспериментов в классах автоматов Мили на основе их представления конструктивными окрестностями в специальных эффективных «бэровских» метрических пространствах автоматов.

Позднее, данный подход был распространен на произвольные неструктурированные множества дескрипторов и специализированные алгебраические структуры [6-8], что позволило найти ряд общих закономерностей структуры представлений, включая и представления классов автоматов Мили.

В работе [9] автором и Курганским А.Н. данные идеи были адаптированы к исследованию конечных связных автоматов без выхода на основе определяющих соотношений. Благодаря идеям, предложенным Курганским А.Н., особый акцент был сделан на использовании аппарата коалгебр как категориального аналога динамических систем.

Целью настоящей статьи является применение синтеза вышеописанных подходов к исследованию алгебр Клини на произвольных идемпотентных замкнутых полукольцах, которые являются обобщением регулярных выражений в теории автоматов и взвешенных графов [9, 10].

Статья состоит из введения, трех разделов и выводов. В первом разделе введены необходимые понятия. Во втором разделе исследованы алгебраические свойства различных классов регулярных выражений в алгебре Клини общего вида. В третьем разделе изучена представимость алгебр Клини, доказан критерий существования финитных представлений в терминах «бэровских» метрик и охарактеризованы алгебраические структуры представлений различных типов.

Основные понятия и определения. Рассмотрим полукольцо вида $(A, +, \circ)$, где A - счетное множество объектов, $(A, +)$ - коммутативный моноид, $(A, \circ)$ - полугруппа со

свойством дистрибутивности относительно операций $+$, $\circ$ и поглощения нулем относительно операции $\circ$ [10].

Полукольцо идемпотентно, если для любого элемента a имеет место соотношение идемпотентности $a + a = a$. Последовательность элементов $\{a_i\}$ назовем сходящейся, если существует предельный элемент $b = \sup\{a_i\} = \sum_i a_i$. Определим для произвольного элемента полукольца a итерацию a^* как сумму $\sum_{i=1}^{\infty} a^i$. Алгеброй Клини регулярных выражений назовем идемпотентное полукольцо $\mathbb{R} = (A, +, \circ, *)$, а регулярным выражением – любое конечное выражение в этой алгебре Клини.

Каждому регулярному выражению $R \in \mathbb{R}$ поставим в соответствие регулярный язык $L(R) = \{a_1 \circ a_2 \dots \circ a_n \in A \mid a_1 \circ a_2 \dots \circ a_n + R = R\}$ по аналогии с регулярными языками в теории автоматов [1].

По аналогии с алгеброй Клини для автоматов показано [1], что регулярному выражению $R + Q$ соответствует язык $L(R) \cup L(Q)$, а регулярному выражению $R \cap Q$ – язык $L(R) \cap L(Q)$. Далее по тексту регулярные выражения из $\mathbb{R}$ будем называть объектами.

Регулярные выражения R и Q считаем эквивалентными ($R \equiv Q$), если выполнено равенство $L(R) \equiv L(Q)$. Алгебру Клини $\mathbb{R}$ назовем факторизованной, если она совпадает со своим фактором по данному отношению эквивалентности.

Также введем на $\mathbb{R}$ частичный порядок, полагая $R \leq Q$ точно тогда, когда $L(R) \subseteq L(Q)$.

Для каждого объекта $R \in \mathbb{R}$ зададим функцию сложности $n: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{N}^+ \cup \infty$, для которой выполнены следующие свойства:

1. Для любых объектов A, B из $A \leq B$ вытекает $n(A) \leq n(B)$
2. Для любой сходящейся последовательности $\{A_i\}$ выполнено соотношение $n(\sum_i A_i) = \sup(n(A_i))$

Также в алгебре Клини $\mathbb{R}$ назовем подмножество $R_f = \{A \in \mathbb{R} \mid n(A) < \infty\}$ множеством финитных объектов, а $R_{in} = \{A \in \mathbb{R} \mid n(A) = \infty\}$ – множеством инфинитных объектов.

Каждому объекту $A \in \mathbb{R}$ поставим в соответствие множества фрагментов $Fr(A) = \{B \in \mathbb{R} \mid B \leq A\}$, кофрагментов $CoFr(A) = \{B \in \mathbb{R} \mid B \not\leq A\}$ и точных кофрагментов $CtFr(A) = \{B \in \mathbb{R} \mid B \cap A = \emptyset\}$. Символом $\not\leq$ далее по тексту обозначаем не сравнимость элементов относительно порядка $\leq$. Для упрощения положим также $Fr(\mathbb{R}) = \{Fr(R) \mid R \in \mathbb{R}\}$. Сужения введенных множеств на множества объектов со сложностью не выше некоторого фиксированного натурального числа N обозначим соответственно:

$$Fr^N(A) = \{B \in Fr(A) \mid n(B) \leq N\}, CoFr^N(A) = \{B \in CoFr(A) \mid n(B) \leq N\}$$

$$\text{и } CtFr^N(A) = \{B \in CtFr(A) \mid n(B) \leq N\}.$$

Объект C назовем разделяющим для A и B ($C \in S(A, B)$), если выполнено точно одно из соотношений ($C \leq A, C \not\leq B$) или ($C \not\leq A, C \leq B$).

На множестве объектов зададим «расстояние» между объектами β аналогично «бэровской» метрике [1, 3], полагая, что $\beta(A, B) = 0$, если $A \cong B$ и $\beta(A, B) = 1/r$, где $r = \inf\{n(C) \mid C \in S(A, B)\}$ в противном случае. Заметим, что это не метрика в классическом смысле, так как объекты A, B могут быть не эквивалентными, но при этом выполнено равенство $\beta(A, B) = 0$.

Введем также множество предельных объектов $LimF$ для класса объектов F следующим образом $LimF = \{B \in \mathbb{R} \mid \inf\{\beta(B, C) \mid C \in F, C \not\cong B\} = 0\}$.

Алгебру Клини назовем финитно разделимой, если для любых не эквивалентных объектов существует их разделяющий финитный объект.

Легко показать, что произвольная алгебра Клини в общем случае не является финитно разделимой.

Пару объектов $(A, B) \in Fr(A_0) \times CoFr(A_0)$ назовем представлением для некоторых

$A_0 \in \mathbb{R}, F \subseteq \mathbb{R}$, если для любого $C \in F$ из включения $(A, B) \in Fr(C) \times CoFr(C)$ вытекает $C \cong A_0$.

Пару объектов $(A, B) \in Fr(A_0) \times CtFr(A_0)$ будем считать точным представлением для некоторых $A_0 \in \mathbb{R}, F \subseteq \mathbb{R}$, если для любого $C \in F$ из включения $(A, B) \in Fr(C) \times CtFr(C)$ вытекает $C \cong A_0$.

Прямым представлением назовем представление вида $(A, 0)$, а косвенным – представление вида $(0, B)$.

Введем операцию $+$ над парами объектов (A, B) следующим образом:

$$(A_1, B_1) + (A_2, B_2) = (A_1 + A_2, B_1 + B_2).$$

Определим также над парами объектов (A, B) частичный порядок, полагая $(A_1, B_1) \leq (A_2, B_2)$ тогда и только тогда, когда $A_1 \leq A_2$ и $B_1 \leq B_2$.

Назовем алгебру Клини $\mathbb{R} = (A, +, \circ, *)$ локально замкнутой, если для всякого $A \in \mathbb{R}$ произвольные бесконечные последовательности объектов из $Fr(A)$ и $CoFr(A)$ сходятся.

Алгебраическая структура подмножеств алгебры Клини на полукольцах. Следующие лемма и утверждение доказывают изоморфизм алгебры Клини $\mathbb{R}$ и множества фрагментов $Fr(\mathbb{R})$ как частично упорядоченных множеств с сохранением функции сложности.

Лемма 1. Для произвольной алгебры Клини $\mathbb{R}$ справедливы утверждения:

1. Для любых объектов A и B условие $A \leq B$ равносильно $Fr(A) \subseteq Fr(B)$;
2. Для любых объектов A и B условия $A \cong B$ равносильно условию $Fr(A) = Fr(B)$

Доказательство:

1. Предположим противное, то есть существует некоторое регулярное выражение $R \in Fr(A) - Fr(B)$. Но тогда также существует слово $q \in L(A) - L(B)$, что по определению противоречит $A \leq B$. Обратно, пусть $Fr(A) \subseteq Fr(B)$. Произвольно выберем некоторое слово $p \in L(A)$. Данное слово является также регулярным выражением, то есть $p \in Fr(A)$. Но в силу включения $Fr(A) \subseteq Fr(B)$ слово $p \in Fr(B)$, что и доказывает верность $A \leq B$.

2. Из соотношения $A \cong B$ по определению выполнено $L(A) = L(B)$. Предположим, что множества $Fr(A)$ и $Fr(B)$ не совпадают. Выберем произвольно $R \in Fr(A) \oplus Fr(B)$, что по определению означает $L(R) \subseteq L(A) \oplus L(B)$. Полученное противоречие завершает доказательство.

Утверждение 2. Алгебраические системы $(\mathbb{R}/\cong, \leq, n)$ и $(Fr(\mathbb{R}), \subseteq, n)$ изоморфны.

Доказательство:

Введем некоторое соответствие δ классов эквивалентности $\cong A$ и множеств $Fr(A)$. Согласно лемме 1 существует биекция между $\mathbb{R}/\cong$ и $Fr(\mathbb{R})$. На $\mathbb{R}/\cong$ предпорядок $A \leq B$ индуцирует предпорядок $\cong A \leq \cong B$. Заметим также, что функция сложности удовлетворяет следующим соотношениям $n(\cong A) = \sup\{n(B) \mid B \cong A\} = n(A)$ и $n(Fr(A)) = \sup\{n(B) \mid B \leq A\} = n(A)$

Утверждение доказано.

Алгебраическую структуру множеств фрагментов и кофрагментов регулярного выражения описывает

Утверждение 3. Для любого регулярного выражения $R \in \mathbb{R}$ справедливо:

1. Множество $Fr(R)$ является булевой алгеброй с операциями $(Fr(R), \cap, +)$ с нулем $\emptyset$ и единицей R .

2. Для любого натурального N множества $CoFr(R)$, $CtFr(R)$, $CoFr^N(R)$, $CtFr^N(R)$ являются идемпотентными коммутативными полугруппами с операцией $+$.

Доказательство:

1. Множество $Fr(R)$ является булевой алгеброй, так как произвольному объекту $Q \in Fr(R)$ соответствует обратный объект $\overline{Q}$ с регулярным языком $L(R) - L(Q)$ и все свойства булевой алгебры индуцируются аналогичными свойствами булевой алгебры порожденных языков.

2. Пусть даны два объекта $A, B \in CoFr(R)$. Покажем, что $A + B \in CoFr(R)$. Если это условие не верно, тогда $A + B \in Fr(R)$ и $A \leq A + B$. Полученное противоречие доказывает замкнутость множества $CoFr(R)$ относительно операции $+$. Идемпотентность, коммутативность и ассоциативность операции $+$ на множестве $CoFr(R)$ следует из аналогичных свойств операции $+$ в алгебре Клини $\mathbb{R}$. Аналогичное утверждение для $CoFr^N(R)$ вытекает из того факта, что сложность суммы двух объектов не превосходит минимума сложности слагаемых.

Пусть теперь даны два объекта $C_1, C_2 \in CtFr(R)$. В этом случае выполнены соотношения $L(C_1) \cap L(R) = \emptyset$ и $L(C_2) \cap L(R) = \emptyset$. Тогда получаем истинность $(L(C_1) \cup L(C_2)) \cap L(R) = (L(C_1) \cap L(R)) \cup (L(C_2) \cap L(R)) = \emptyset$, что и доказывает замкнутость $CtFr(R)$ относительно операции $+$: $C_1 + C_2 \in CtFr(R)$,

Идемпотентность, коммутативность и ассоциативность операции $+$ на множестве $CtFr(R)$ следует из аналогичных свойств операции $+$ в алгебре Клини $\mathbb{R}$.

Аналогичное утверждение для $CtFr^N(R)$ следует из того, что сложность суммы двух объектов не превосходит минимума сложности слагаемых.

Следующее утверждение доказывает минимальность точных представлений среди всех представлений класса объектов.

Утверждение 4. Дана произвольная алгебра Клини $\mathbb{R}$. Пусть пара (A, B) является представлением для некоторых $R_0 \in \mathbb{R}$ и $F \subseteq \mathbb{R}$. Тогда существует пара $(A', B') \leq (A, B)$, являющаяся точным представлением для R_0 и F .

Доказательство:

Зафиксируем такие объекты $A' = A, B' = B - B \cap R_0$. Покажем, что пара этих объектов является искомым точным представлением для R_0 и F . Выберем произвольный не эквивалентный R_0 объект из $C \in F$. Заметим, что если такого объекта нет, то пара (A', B') является искомым точным представлением.

В противном случае для объекта $C \in F$ выполнено одно из условий $A \triangleleft C, B \leq C$. Но тогда выполнено как минимум одно из условий $A_1 \triangleleft C, B_1 \leq B \leq C$. А это значит, что искомая пара (A', B') является искомым точным представлением и удовлетворяет условию минимальности $(A', B') \leq (A, B)$.

Представимость регулярных выражений на полукольцах. Покажем, что в алгебрах Клини на идемпотентных полукольцах справедливы результаты, аналогичные результатам стандартных алгебр Клини [1, 3].

Предварительно докажем вспомогательное:

Утверждение 5. Дана произвольная алгебра Клини $(\mathbb{R}, +, \circ, *)$. Тогда выполнено:

1. Множества $\mathbb{R}_f$ и $\mathbb{R}_{in}$ замкнуты относительно операции $+$.
2. Факторизованная алгебра Клини $(\mathbb{R}, +, \circ, *)$ является дистрибутивной решеткой.

Доказательство:

1. Замкнутость множеств $\mathbb{R}_f$, $\mathbb{R}_{in}$ следует из того факта, что сумма двух финитных (инфинитных) объектов является также финитной (инфинитной).

2. Покажем, что для двух произвольных объектов A, B объект $A + B$ является супремумом этих объектов. Действительно, регулярное выражение $A + B$ порождает язык $L(A) \cup L(B)$, который является супремумом языков $L(A)$ и $L(B)$. Аналогичным образом показывается, что объект $A \cap B$ является инфимумом объектов A, B . Выполнимость аксиом дистрибутивной решетки следует из дистрибутивности решетки регулярных языков относительно операций $\cap, \cup$.

В работе [6] был приведен пример отсутствия представления для объекта и конечного множества объектов, что не верно в общем случае для классов автоматов или размеченных графов. Для произвольных алгебр Клини $(\mathbb{R}, +, \circ, *)$ справедливо

Утверждение 6. Дана произвольная алгебра Клини $(\mathbb{R}, +, \circ, *)$.

1. Существует алгоритм порождения точного представления для любого A_0 и конечного множества F .
2. Для финитно разделимой алгебры Клини $(\mathbb{R}, +, \circ, *)$ существует алгоритм построения финитного точного представления для всякого A_0 и конечного множества F .

Доказательство:

1. Пусть дано конечное множество объектов $F = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$. Выделим из данного множества объекты, не эквивалентные A_0 . Если таких объектов нет, то представление $(A_0, 0)$ является искомым точным представлением. В противном случае, существует некоторый объект C_i , разделяющий объекты A_0 и A_i , где $i \leq N$. Если выполнено условие $C_i \leq A_0$, то обозначим объект C_i' , в противном случае - C_i'' . При необходимости кофрагмент C_i'' преобразуем в точный кофрагмент, выбрасывая из него пересечение объектов A_0 и C_i'' . Результатом работы данного алгоритма, перечисляющего все регулярные выражения из алгебры Клини и определяющего, является ли данное выражение разделяющим элементом, будет два конечных множества $\{C_i'\}$ и $\{C_i''\}$. Сконструируем теперь объекты, суммируя объекты первого и второго множества $C' = \sum_i C_i'$ и $C'' = \sum_i C_i''$. Покажем теперь, что пара (C', C'') будет искомым точным представлением для A_0 и F .

Действительно, согласно утверждению 3 получаем, что $C' \leq A_0, C'' \triangleleft A_0$. Предположим, что существует такой не эквивалентный A_0 объект $B \in F$, что $C' \leq B$ и C'' - точный кофрагмент B . Пусть C_s' - разделяющий объект для объектов B, A_0 . Но тогда выполнено $C_s' \triangleleft A_0$, а значит $C' \triangleleft A_0$, что противоречит свойствам фрагмента C' . Если же C_s'' - разделяющий объект для объектов B, A_0 , тогда $C_s'' \leq A_0$, а значит, что C'' не может быть точным кофрагментом A_0 . Полученное противоречие доказывает, что пара (C', C'') будет искомым точным представлением для A_0 и F .

2. Доказательство осуществляется аналогичным образом, как и в пункте 1 с добавлением того факта, что в процессе выбора разделяющих объектов могут быть выбраны множества объектов $\{C_i'\}$ и $\{C_i''\}$ финитной сложности.

Для локально замкнутых алгебраических систем вида $(\mathbb{R}, +, \circ, *)$ имеет место более сильное

Утверждение 7. *Существует точное представление для всякого A_0 и произвольного множества F .*

Доказательство:

Пусть дано некоторое счетное множество объектов $F = \{A_i\}_i$. Оставим в данном множестве только объекты, не эквивалентные A_0 . Если таких объектов нет, то представление $(A_0, 0)$ является искомым точным представлением. В противном случае полагаем, что объект C_i разделяет объекты A_0 и A_i . Если выполнено условие $C_i \leq A_0$, то обозначим данный объект как C_i' , в противном случае - C_i'' . При необходимости кофрагмент C_i'' преобразуем в точный кофрагмент путем удаления пересечения объектов A_0 и C_i'' . В результате получаем два счетных множества $\{C_i'\}$ и $\{C_i''\}$.

Определим следующие объекты $C' = \sup\{C'_i\}_i$ и $C'' = \sup\{C''_i\}_i$. Существование таких супремумов следует из локальной замкнутости $(\mathbb{R}, +, \circ, *)$. Покажем, что полученная пара (C', C'') будет точным представлением для A_0 и F .

Действительно, согласно утверждению 3 получаем, что $C' \leq A_0, C'' \triangleleft A_0$. Предположим, что существует такой не эквивалентный A_0 объект $B \in F$, что $C' \leq B$ и C'' - точный кофрагмент B . Выберем некоторый C'_s , разделяющий объект для объектов B, A_0 . Но тогда выполнено $C'_s \triangleleft A_0$, а значит $C' \triangleleft A_0$, что противоречит свойствам фрагмента C' . Если же C'_s - разделяющий объект для объектов B, A_0 , тогда $C'_s \leq A_0$, и C'' не может быть точным кофрагментом A_0 . Полученное противоречие доказывает, что пара (C', C'') будет искомым точным представлением для A_0 и F .

Представления, сгенерированные в доказательстве утверждения 7, не всегда являются финитными. Однако имеет место истинность следующего метрического критерия существования финитных представлений для разделимых и локально замкнутых алгебр Клини $(\mathbb{R}, +, \circ, *)$:

Теорема 8. *Финитное точное представление для всякого $A_0 \in \mathbb{R}$ и произвольного множества $F \subseteq \mathbb{R}$ существует тогда и только тогда, когда $A_0 \notin \text{Lim}F$.*

Доказательство:

Пусть для $A_0 \in \mathbb{R}$ и множества $F \subseteq \mathbb{R}$ существует некоторое финитное точное представление (A_1, B_1) , для которого сложность пары $n\{A_1, B_1\}$ не превосходит некоторого натурального числа N_0 . Выберем произвольный объект $B \in F$, не эквивалентный A_0 . Если такого объекта не существует, тогда по определению $\text{Lim}F = \emptyset$ и теорема тривиальна.

В противном случае, пара (A_1, B_1) разделяет A_0 и все объекты $B \in F$, не эквивалентные объекту A_0 . Очевидно, что в этом случае $\beta(A_0, B) \geq 1/N_0$. В силу произвольности выбора объекта $B \in F$ делаем вывод, что $A_0 \notin \text{Lim}F$.

Обратно, пусть выполнено $A_0 \notin \text{Lim}F$. Тогда для любого $B_k \in F$, не эквивалентного A_0 , существует объект C_i со сложностью $n(C_i) \leq N_0$, разделяющий B_k и A_0 . Если выполнено условие $C_i \leq A_0$, то обозначим объект C'_i , в противном случае - C''_i . При необходимости кофрагмент C''_i преобразуем в точный кофрагмент путем удаления пересечения объектов A_0 и C''_i .

В результате получаем два не более чем счетных множества $\{C'_i\}$ и $\{C''_i\}$. Определим следующие объекты $C' = \sup\{C'_i\}_i$ и $C'' = \sup\{C''_i\}_i$. Существование таких супремумов следует из локальной замкнутости $(\mathbb{R}, +, \circ, *)$. Покажем, что полученная пара (C', C'') будет искомым финитным представлением для A_0 и F . Действительно, согласно утверждению 3 выполнены соотношения $C' \leq A_0, C'' \triangleleft A_0$. Предположим, что существует такой не эквивалентный A_0 объект $B \in F$, что $C' \leq B$ и C'' - точный

кофрагмент B . Выберем некоторый C'_s , разделяющий объект для объектов B, A_0 . Но тогда выполнено $C'_s \triangleleft A_0$, а значит $C' \triangleleft A_0$, что противоречит свойствам фрагмента C' . Если же C''_s - разделяющий объект для объектов B, A_0 , тогда $C''_s \leq A_0$, и C'' не может быть точным кофрагментом A_0 . Полученное противоречие доказывает, что пара (C', C'') будет искомым финитным представлением для A_0 и F , причем справедливо неравенство $n(\{C', C''\}) \leq N_0$. Теорема 8 доказана.

Метрический критерий представимости неструктурированных множеств дескрипторов [6, 7], алгебраических систем специального вида [8] и теорема 8 обобщают аналогичные метрические критерии представимости для классов автоматов Мили и взвешенных графов [1].

Выводы. В работе методы исследования представлений неструктурированных объектов и специальных алгебраических систем адаптированы для алгебр Клини на идемпотентных полукольцах. Для локально замкнутых и финитно разделимых алгебр Клини получен метрический критерий существования финитных представлений. Описана алгебраическая структура точных представлений для объекта и множества объектов. Данные подходы в более общем виде описываются на языке теории категорий, что позволит применять в дальнейшем синергетический подход теории графов и теории категорий к изучению и обобщению экспериментов с автоматами и взвешенными графами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Грунский, И. С. Синтез и идентификация автоматов / И. С. Грунский, В. А. Козловский. – Киев.: Наукова думка, 2004. – 245 с.
2. Бородай, С. Ю. Эксперименты в эффективно заданных классах автоматов : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.01.09 / Бородай Сергей Юрьевич ; СГУ. – Саратов, 1997. – 21 с.
3. Максименко, И. И. Эксперименты в финитно-определенных метрических пространствах автоматов : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.01.09 / Максименко Игорь Иванович ; СГУ. – Саратов, 2000. – 16 с.
4. Максименко, И. И. Распознавание в эффективно-заданных классах автоматов / И. И. Максименко // Труды института прикладной математики и механики. – 1998. – Т. 2. – С. 115-123.
5. Максименко, И. И. Эксперименты в классах реализации недетерминированных автоматов / И. И. Максименко // Доклады НАН Украины. – 1999 г. – Т. 7. – С. 95-99.
6. Максименко, И. И. Финитные представления неструктурированных объектов / И. И. Максименко // Труды института прикладной математики и механики. – 2009. – Т. 19. – С. 162-167.
7. Грунский, И. С. Распознавание неструктурированных объектов / И. С. Грунский, И. И. Максименко // Труды института прикладной математики и механики. – 2010. – Т. 21. – С. 76-85.
8. Максименко, И. И. Финитные представления в алгебраических системах / И. И. Максименко // Труды института прикладной математики и механики. – 2011. – Т. 18. – С. 56-67.
9. Курганский, А. Н. Коалгебраические элементы теории экспериментов с автоматами / А. Н. Курганский, И. И. Максименко // Донецкие чтения 2016. Образование, наука и вызовы современности: Материалы I Международной научной конференции, Донецк, 16–18 мая 2016 года / Под общей редакцией С.В. Беспаловой. Том 1. – Донецк: Издательство Южного федерального университета, 2016. – С. 240-243.
10. Мельников, О. В. Общая алгебра / О. В. Мельников, В. Н. Ремесленников, В. А. Романьков [и др.] / Под общ. ред. Л. А. Скорнякова. Том 1. – М.: Наука, 1990. – 592 с.

Поступила в редакцию 06.07.2023 г., рекомендована к печати 21.07.2023 г.

RECOGNITION IN KLEENE ALGEBRAS ON IDEMPOTENT SEMIRINGS

Maksimenko I.I., Kotenko V.N.

In this paper, we introduce the concepts of representation, fragment, cofragment, and exact cofragment for Kleene algebras on general idempotent semirings. In terms of a special metric space, a criterion for the finite of representations is formulated. Algebraic properties and conditions for the existence of representations are studied both for general Kleene algebras and for special Kleene algebras.

Keywords: unstructured object, representation, fragment, cofragment, accurate representation, Kleene algebra, idempotent closed semiring.

Максименко Игорь Иванович

кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры компьютерных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: igor.maksimenko_1967@mail.ru

Maksimenko Igor Ivanovich

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Lecturer at Department of Computer Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Котенко Владислав Николаевич

старший преподаватель кафедры компьютерных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: v.kotenko@donnu.ru

Kotenko Vladislav Nikolaevich

Senior Lecturer at Department of Computer Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

УДК 681.5:519.217

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СКРЫТЫХ МАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ С ЯВНЫМ ОБРАЗОМ ЗАДАННОЙ ФУНКЦИЕЙ ПЛОТНОСТИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ СОСТОЯНИЙ В АСНИ

© 2023 Третьяков И.А.

В данной работе приводится обоснование целесообразности применения специальных типов скрытых марковских моделей, в частности с явно заданной функцией плотности распределения длительности состояний, в автоматизированных системах научных исследований. Приведен алгоритм генерации последовательности наблюдений и процедура переоценки параметров для такой модели.

Ключевые слова: скрытая марковская модель, АСНИ, функция плотности, длительность состояний, переходная вероятность, вычислительная операция.

Введение. При проведении научных исследований существует постоянная потребность в анализе и обработке больших массивов данных для извлечения наиболее ценной информации. В такой роли скрытые марковские модели (СММ) стали полезным инструментом для моделирования и прогнозирования различных процессов [1-3]. СММ представляют собой статистическую модель, основанную на теории марковских процессов, и широко применяются в автоматизированных системах научных исследований (АСНИ) [4-6].

В классических типах СММ [7] принято считать наблюдения дискретными символами из конечного алфавита, а задание текущих значений этих символов выполняется посредством дискретных функций плотности вероятности. Проблема такого подхода заключается в том, что во многих прикладных задачах наблюдения являются непрерывными сигналами или векторами (акустические и речевые сигналы, радиоволны и т.д.), квантование которых зачастую приводит к большим искажениям исходного сигнала. Поэтому актуальной задачей является поиск возможностей применения специальных типов скрытых марковских моделей в автоматизированных системах научных исследований для решения прикладных задач.

В работе [8] рассмотрена применимость СММ с функцией плотности распределения наблюдений в АСНИ, в которых наблюдения O соответствуют скрытым состояниям S модели. Для такой СММ вероятность того, что она останется в текущем состоянии d моментов времени (длительность состояний), определяется как вероятность последовательности наблюдений $O = \left\{ S_1, S_2, S_3, \dots, S_d, S_{d+1} \neq S_d \right\}$ модели λ , откуда:

$$P(O|\lambda) = (a_{ij})^{d-1} (1 - a_{ij}) = p_i(d), \quad (1)$$

где a_{ij} - переходная вероятность (вероятность смены состояний).

Величина $p_i(d)$ в формуле (1) представляет собой дискретную функцию плотности вероятности пребывания модели λ в состоянии i в течение времени d . Эта функция является экспоненциальной и характеризует длительность данного состояния в цепи Маркова [9].

Математическое ожидание непрерывного пребывания в текущем состоянии (ожидаемое число повторений текущего состояния) из (1) определяется следующим образом:

$$\bar{d}_i = \sum_{d=1}^{\infty} dp_i(d) = \sum_{d=1}^{\infty} d(a_{ij})^{d-1}(1-a_{ij}) = \frac{1}{1-a_{ij}}.$$

Однако, такой способ моделирования длительности состояний не является универсальным, например при распознавании образов и в некоторых других прикладных случаях [4, 5] выходит целесообразнее моделировать ее явно. Таким образом, в работе рассматривается целесообразность применения специальных типов скрытых марковских моделей, в частности с явным образом заданной функцией плотности длительности состояний, в АСНИ.

Модели с функцией плотности длительности состояний. Впервые СММ с функциями плотности вероятности длительности состояний введены и рассмотрены в работах [10, 11] по базовым принципам распознавания речи.

На рисунке 1 показаны очевидные отличия между скрытыми марковскими моделями с неявно и явно заданными функциями плотности длительности состояния для двух скрытых состояний модели S_i и S_j .

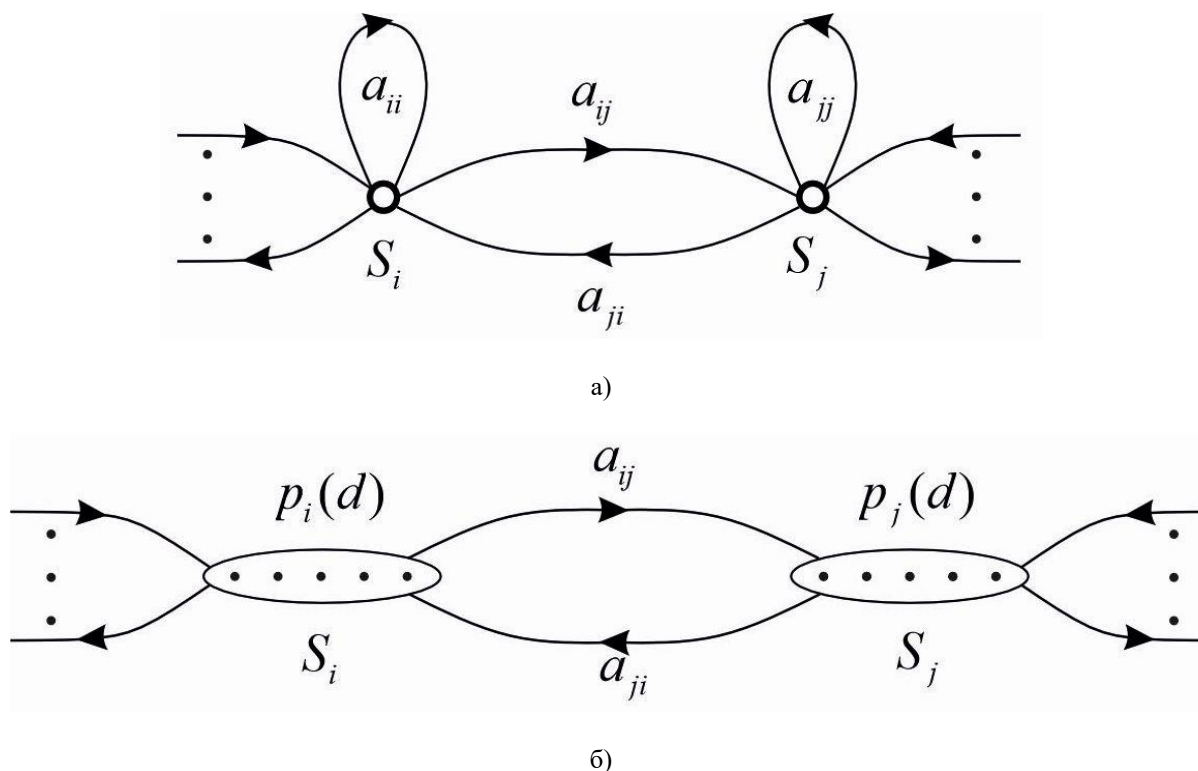


Рис. 1. Визуализация отличий СММ:

а) классическая СММ

б) СММ с явно заданной плотностью длительности состояний

Для модели (рисунок 1а) функции плотности длительности скрытых состояний S определяются по переходным вероятностям a и являются экспоненциальными (1), т.е. заданы не явно.

Для модели (рисунок 1б) вероятности перехода в то же состояние a_{ii} и a_{jj} приняты равными нулю, и соответственно функции плотности длительности состояний $p_i(d)$ заданы явно. Иными словами, в такой модели не допускаются переходы в то же текущее состояние, а переход из текущего состояния в другое будет происходить только после генерации такого количества наблюдений O , которое задано функцией плотности $p_i(d)$. Таким образом, в СММ с явно заданной $p_i(d)$ генерация последовательности наблюдений O осуществляется посредством следующего алгоритма:

- состояние в первый момент времени $q_1 = S_i$ определяется в соответствии с матрицей вероятности начальных состояний π_i ;
- длительность нахождения в первом состоянии d_1 определяется в соответствии с функцией плотности $p_{q_1}(d)$;
- вводится ограничение D максимального значения d_1 ;
- наблюдения $(O_1, O_2, \dots, O_{d_1})$ выбираются из матрицы совместных наблюдений b_{q_1} ;
- проверяется условие независимости выбранных наблюдений $b_{q_1}(O_1, O_2, \dots, O_{d_1}) = \prod_{t=1}^{d_1} b_{q_1}(O_t)$, где O_t - наблюдение в момент времени t ;
- состояние в следующий момент времени $q_2 = S_j$ определяется в соответствии с переходной вероятностью $a_{q_1 q_2}$;
- переходная вероятность устанавливается $a_{q_1 q_2} = 0$ для недопущения возврата модели в то же состояние.

Далее, для применения к такой модели методов повторной оценки параметров и вычисления $P(O|\lambda)$ необходимо, чтобы интервалы длительности состояний были полностью включены в последовательность наблюдений, т.е. необходимо ввести следующие уточнения:

- первое состояние заканчивается в момент времени $t = 1$;
- последнее состояние заканчивается в момент времени $t = T$;
- за время t первых наблюдений сменилось r состояний $(q_1, q_2, \dots, q_r)$ с длительностями $(d_1, d_2, \dots, d_r)$, т. е. $q_r = S_i$, $\sum_{s=1}^r d_s = t$.

Таким образом, прямые и обратные переменные для применения алгоритма прямого-обратного хода [12] определяются следующим образом:

$$\alpha_t(i) = P(O_1, O_2, \dots, O_t, S_i \text{ заканчивается в момент } t | \lambda),$$

$$\alpha_t^*(i) = P(O_1, O_2, \dots, O_t, S_i \text{ начинается в момент } t+1 | \lambda),$$

$$\beta_t(i) = P(O_{t+1}, \dots, O_T | S_i \text{ заканчивается в момент } t, \lambda),$$

$$\beta_t^*(i) = P(O_{t+1}, \dots, O_T | S_i \text{ начинается в момент } t+1, \lambda).$$

Таким образом, формулы повторной оценки параметров для модели с явно заданной плотностью длительности состояний имеют вид:

$$\begin{aligned}\overline{\pi_i} &= \frac{\pi_i \beta_0^*(i)}{P(O|\lambda)}; \quad \overline{a_{ij}} = \frac{\sum_{t=1}^T \alpha_t(i) a_{ij} \beta_t^*(j)}{\sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T \alpha_t(i) a_{ij} \beta_t^*(j)}; \\ \overline{b_i(k)} &= \frac{\sum_{t=1, O_t=k}^T \left[\sum_{T < t} \alpha_T^*(i) \beta_T^*(i) - \sum_{T < t} \alpha_T(i) \beta_T(i) \right]}{\sum_{k=1}^M \sum_{t=1, O_t=V_k}^T \left[\sum_{T < t} \alpha_T^*(i) \beta_T^*(i) - \sum_{T < t} \alpha_T(i) \beta_T(i) \right]}; \\ \overline{p_i(d)} &= \frac{\sum_{t=1}^T \alpha_t^*(i) p_i(d) \beta_{t+d}(i) \prod_{s=t+1}^{t+d} b_i(O_s)}{\sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T \alpha_t^*(i) p_i(d) \beta_{t+d}(i) \prod_{s=t+1}^{t+d} b_i(O_s)}.\end{aligned}$$

Физический смысл формул повторной оценки заключается в следующем:

- $\overline{\pi_i}$ - вероятность того, что при заданных наблюдениях O первым состоянием модели было состояние S_i ;
- $\overline{a_{ij}}$ - ожидаемое число переходов из состояния S_i в состояние S_j при условии, что прямые переменные, для которых состояние S_i заканчивается в момент t , объединяются с обратными переменными, для которых новое состояние S_j начинается в момент $t+1$;
- $\overline{b_i(k)}$ - ожидаемое число появлений символа наблюдения $O_t = V_k$ в состоянии S_i , нормированное ожидаемым числом появления любых символов в состоянии S_i ;
- $\overline{p_i(d)}$ - отношение ожидаемого числа раз, в которых состояние S_j имело длительность d , к общему числу появлений состояния S_j любой длительности.

Целесообразность применения в АСНИ. Целесообразность явного задания функций плотности вероятности длительности состояний и применения таких СММ в автоматизированных системах научных исследований обосновывается значительным повышением качества и точности моделирования, например до 92% при распознавании речи [13], при распознавании образов и в некоторых других прикладных случаях [4, 5]. Однако, повышение эффективности модели приводит к увеличению вычислительных мощностей. Например, из-за смены длительностей состояний для определения значений переменных алгоритма прямого-обратного хода, объем требуемой для вычислений памяти увеличивается в $\sim D$ раз, а количество вычислительных операций в $\sim \frac{D^2}{2}$ раз в сравнении с классическими СММ. Таким образом, для усредненного значения при выполнении задач, связанных с обработкой речи $D = 50$ количество вычислительных операций увеличивается более чем в 10^3 раз.

Этот недостаток можно компенсировать посредством параметрического задания функции плотности длительности состояний, например семейство гауссовских плотностей распределения $p_i(d) = \chi(d, \mu_i, \sigma_i^2)$ с параметрами μ_i , σ_i^2 или набор плотностей, описываемых гамма-функцией $p_i(d) = \frac{\eta_i^{v_i} d^{v_i-1} e^{-\eta_i d}}{\Gamma(v_i)}$, с параметрами v_i , η_i ,

средним значением $v_i \eta_i^{-1}$ и дисперсией $v_i \eta_i^{-2}$. Также к сокращению вычислительных операций приводит равномерное распределение длительности состояний и применение алгоритма декодирования Витерби для ограниченного пути [14].

Еще одним недостатком такой СММ является необходимость помимо обычных параметров повторно оценивать дополнительное, равное D количество новых параметров. Это компенсируется посредством ограничения количества наблюдений T , и тогда обучающее множество модели содержит даже меньшее количество смен состояний и меньшее количество данных для оценивания $p_i(d)$, чем классическая модель.

Кроме того, для автоматизированных систем научных исследований, в которых в качестве СММ применяется лево-правая модель (модель Бакиса) [7] с количеством состояний пропорциональным средней длительности последовательности наблюдений, задание функции плотности длительности состояния явным образом не является ни необходимым, ни тем более целесообразным.

Выводы. Использование СММ с явно заданной функцией плотности длительности состояний в АСНИ позволяет получить наиболее важную информацию из сложных массивов данных, повысить точность и эффективность моделирования, улучшить качество распознавания в сравнении с классическими моделями.

Таким образом, специальные типы скрытых марковских моделей функцией плотности длительности состояний вполне применимы в автоматизированных системах научных исследований для решения широкого спектра задач.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Заморенов, М. В. Моделирование полумарковской системы с учетом непростого потока восстановления / М. В. Заморенов, В. Я. Копп, Н. И. Чаленков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 112-119. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-3-112-120. – EDN FVTFDF.
2. Обжерин, Ю. Е. Полумарковская и скрытая марковская модели функционирования автономного ветродизельного комплекса / Ю. Е. Обжерин, С. М. Сидоров, С. Н. Федоренко // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 70-82. – DOI 10.38028/ESI.2022.28.4.005. – EDN BSUKZZ.
3. Токарев, В. Л. Скрытые марковские модели в задаче обнаружения атак на компьютерные сети / В. Л. Токарев // Чебышевский сборник. – 2021. – Т. 22, № 5(81). – С. 391-399. – DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-5-391-399. – EDN FDRRVI.
4. Разработка автономной автоматизированной системы непрерывного контроля состояния строительного объекта / В. Ю. Подлесный, В. И. Тимченко, И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 51-59. – EDN PNCERN.
5. Тимченко, В. И. Определение параметров упругой среды при ударном воздействии / В. И. Тимченко, В. А. Сорока, В. А. Ступак [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2020. – № 4. – С. 18-25. – EDN UNGIDR.
6. Третьяков, И. А. Исследование применимости автоматизированной системы лингвистического анализа экспериментальных данных научных исследований / И. А. Третьяков // Интеллектуальные информационные системы: труды Международной научно-практической конференции (Воронеж, 2-4

- декабря 2020 г.): в 2 ч. / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. – Ч.2. – С. 38-41. – EDN WLOAWZ.
7. Третьяков, И. А. Классификация скрытых марковских моделей / И. А. Третьяков // Донецкие чтения 2022: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы VII Международной научной конференции, посвящённой 85-летию Донецкого национального университета (Донецк, 27–28 октября 2022 г.). – Том 2: Физические, технические и компьютерные науки / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Донецк: Изд-во ДонНУ, 2022. – С. 203-205. – EDN RSVCWV.
 8. Третьяков, И. А. Обоснование применения скрытых марковских моделей с функцией плотности распределения наблюдений в АСНИ / И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 16-21. – EDN DOIFMY.
 9. Baum, L. E. Statistical inference for probabilistic functions of finite start Markov chains / L. E. Baum, T. Petrie // The annals of mathematical statistics. – 1966. – V. 3. – № 6. – P. 1554-1563. – DOI 10.1214/aoms/1177699147.
 10. Levinson, S. E. An introduction to the application of the theory of probabilistic functions of a Markov process to automatic speech recognition / S. E. Levinson, L. R. Rabiner, M. M. Sondhi // The Bell System Technical Journal. – 1983. – V. 62. – № 4. – P. 1035-1074. – DOI 10.1002/j.1538-7305.1983.tb03114.x.
 11. Juang, B. H. On the hidden Markov model and dynamic time warping for speech recognition — A unified view / B. H. Juang // AT&T Bell Laboratories Technical Journal. – 1984. – V. 63. – № 7. – P. 1213-1243. – DOI 10.1002/j.1538-7305.1984.tb00034.x.
 12. Yu, S. Z. An Efficient Forward-Backward Algorithm for an Explicit - Duration Hidden Markov Model / S. Z. Yu, H. Kobayashi // IEEE Signal Processing Letters. – 2003. – Vol. 10. – № 1. – P. 11-14. – DOI 10.1109/LSP.2002.806705.
 13. Третьяков, И. А. Реализация и тестирование автоматизированной системы текstoneзависимой идентификации диктора / И. А. Третьяков, Е. Н. Кожекина // Импортозамещение, научно-техническая и экономическая безопасность: сб. ст. V Междунар. науч.-техн. конф. «Минские научные чтения-2022» в 3 т. (Минск, 07–09 декабря 2022 г.). – Т. 2. – Минск: БГТУ, 2022. – С. 338-342. – EDN ENMOZX.
 14. Forney, D. G. The Viterbi Algorithm / D. G. Forney // Proceedings of the IEEE. – 1973. – Vol. 61. – № 3. – P. 268-278. – DOI 10.1109/PROC.1973.9030.

Поступила в редакцию 11.08.2023 г., рекомендована к печати 28.08.2023 г.

THE EXPEDIENCY OF USING HIDDEN MARKOV MODELS WITH AN EXPLICITLY GIVEN FUNCTION OF THE DENSITY OF THE DURATION OF STATES IN ASRS

Tretiakov I.A.

This paper provides a justification for the expediency of using special types of hidden Markov models, in particular with an explicitly given density function of the distribution of the duration of states, in automated systems of scientific research. An algorithm for generating a sequence of observations and a procedure for revaluation of parameters for such a model is given.

Keywords: hidden Markov model, ASRS, density function, duration of states, transient probability, computational operation.

Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, заместитель декана по научной работе, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Deputy Dean for Research, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Э Н Е Р Г Е Т И К А И Э Л Е К Т Р О Т Е Х Н И К А

УДК 536.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛА С УПОРЯДОЧЕННОЙ СТРУКТУРОЙ, ОСНОВАННОЙ НА ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ МИНИМАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ШВАРЦА Р, С УЧЁТОМ КОНВЕКЦИИ

© 2023 *Попов А.И., Брагин Д.М., Зинина С.А., Еремин А.В.*

В работе выполнено исследование теплопроводности пористого материала с упорядоченной структурой, основанной на трижды периодической минимальной поверхности Шварца Р, с учетом конвекции воздуха, заполняющего полости внутри решетки. Исследование проводилось для одной элементарной TPMS ячейки. Для решения взаимосвязанной задачи тепломассопереноса в работе применялся модуль Fluent программного комплекса ANSYS. Были изучены свойства элементарной ячейки с длиной ребра куба $a=10$ мм и толщинами стенки $0,4<\delta<1$ мм. В ходе работы было определено, что теплопроводность пористого TPMS материала имеет линейную зависимость от толщины стенки ячейки. Исследование имеет как научное, так и прикладное значение, поскольку открывает возможности более детального прогнозирования теплопроводящих свойств пористых TPMS материалов.

Ключевые слова: теплопроводность, метод конечных элементов, ANSYS, минимальная поверхность, TPMS.

Введение. Теплообменное оборудование является неотъемлемым элементом множества промышленных и бытовых устройств [1-3]. Теплообменники, как правило, используются для передачи тепла между двумя и более, жидкими или газообразными средами [4-6]. При разработке теплообменных устройств требуется такая конструкция теплообменников, которая бы позволяла получить большую эффективность при меньшем размере [2]. Одним из решений может быть применение пластинчатых теплообменников, которые обладают высоким коэффициентом теплоотдачи и имеют минимально возможную массу [5,6]. Другим вариантом является применение теплообменников с микро- и наноструктурированными поверхностями, которые обеспечивают большую площадь для передачи тепла. В качестве поверхностей для такого теплообменника могут применяться трижды периодические минимальные поверхности (TPMS, от англ. triply periodic minimal surface) [7-9].

В настоящее время активно возрастает внимание к конструкциям, основанным на TPMS топологии. В первую очередь это связано с высокими удельными прочностными характеристиками TPMS конструкций, что подтверждается рядом исследований [10-12]. Однако, наряду с прочностными свойствами большое внимание уделяется процессам тепломассопереноса в TPMS-материалах. Существует множество работ, посвященных изучению как гидродинамических [13-15], так и теплопроводящих свойств [7-9,16-20] пористых материалов, структура которых основана на TPMS. Например, в [16] Дутковски отметил, что изучение теплотеноса в TPMS структурах имеет большой научно-прикладной потенциал. CFD-моделирование подтверждает, что использование TPMS увеличивает количества Nu в несколько раз вместе с увеличением гидравлического сопротивления. Использование TPMS в теплообменниках позволяет теплообменникам позволять уменьшить их размеры на 60%.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10044: <https://rscf.ru/project/23-79-10044/>

Большинство из вышеотмеченных исследований теплопроводности TPMS решеток не учитывают конвекцию в межпоровом пространстве. В настоящем исследовании рассматривается задача теплопереноса в элементарной ячейке TPMS Шварца Р (рис. 1) с учетом конвекции. Это позволит расширить возможности применения TPMS-материалов в теплообменном оборудовании.

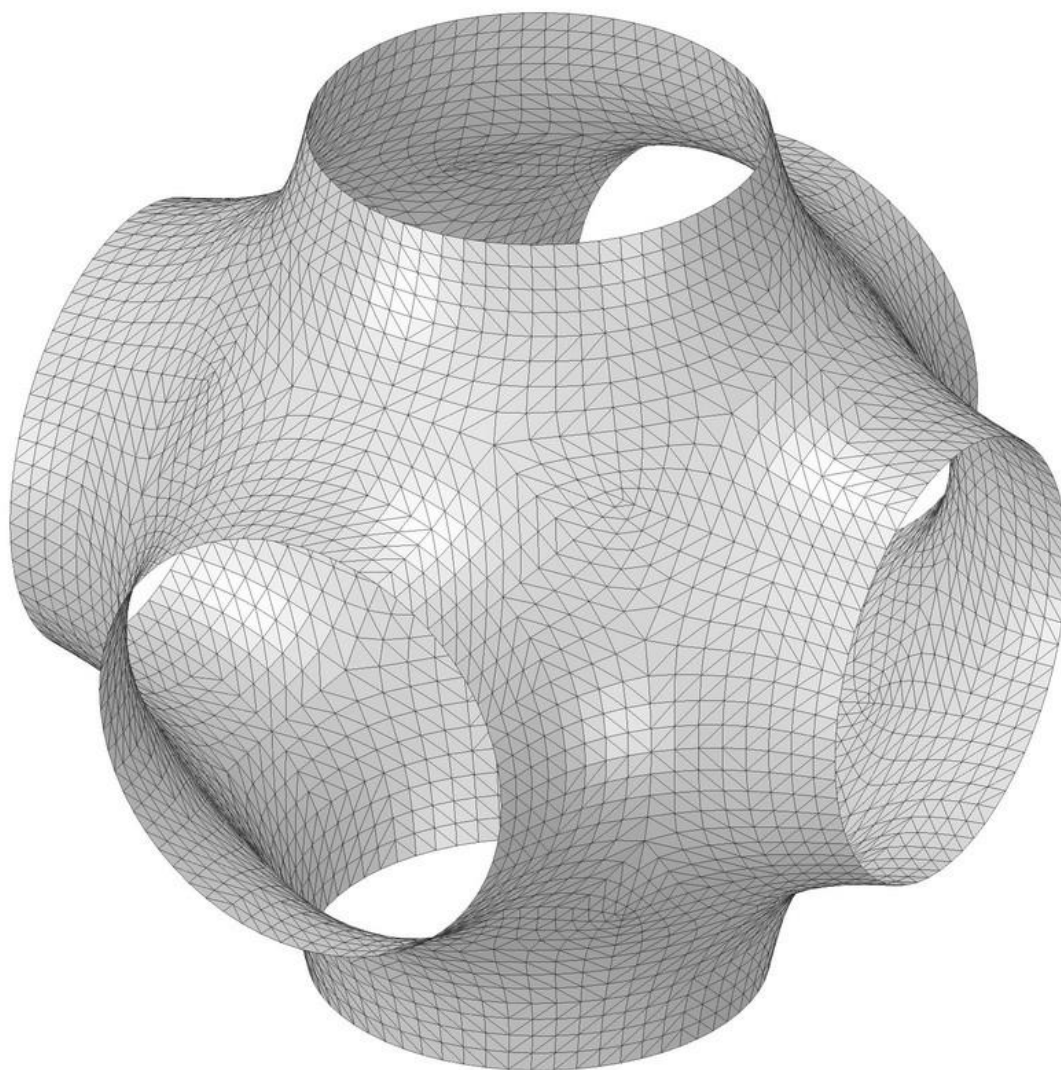


Рис. 1. TPMS Шварца Primitive

Постановка задачи. Существует несколько методов генерации TPMS [21-24]:

- Неявный;
- Параметрический;
- Граничный.

Каждый из методов обладает своими преимуществами и недостатками. В данной работе поверхность Шварца Р была описана при помощи граничного метода, реализованного в программе Surface Evolver [24,25]. При помощи встроенных в программу функций генерируется облако точек, из которого затем получается фасетированная поверхность, изображенная на рисунке 1. Далее поверхности придается толщина во встроенном в ANSYS редакторе SpaceClaim.

TPMS Шварца Р обладает кубической симметрией, что позволяет использовать RVE метод (от англ. representative elementary volume) при исследовании свойств материала. Согласно RVE методу в пористом материале можно выделить такой минимальной объем, над которым можно выполнить измерение, которое даст значение, представляющее свойства всего пористого материала.

На рисунке 2 представлена схема кубической элементарной ячейки, характерными размерами которой являются толщина стенки δ и длина ребра куба a .

TPMS решетка делит пространство на два непересекающихся объема, что хорошо видно на рисунке 2. В рамках данного исследования предполагается, что алюминиевая стенка разделяет куб со свойствами воздуха (при нормальных условиях) на два объема (красная и синяя зона на рис. 2). Свойства используемых материалов представлены в таблице 1.

Задача теплопроводности кубической TPMS ячейки решалась методом конечных элементов в модуле Fluent программного комплекса ANSYS. На отмеченных на рис. 2 гранях куба задаются граничные условия первого рода (T_1 и T_2). Исследование проводилось при постоянном значении длины ребра куба $a = 10$ мм и переменной толщине стенки ячейки $0.4 < \delta < 1$ мм.

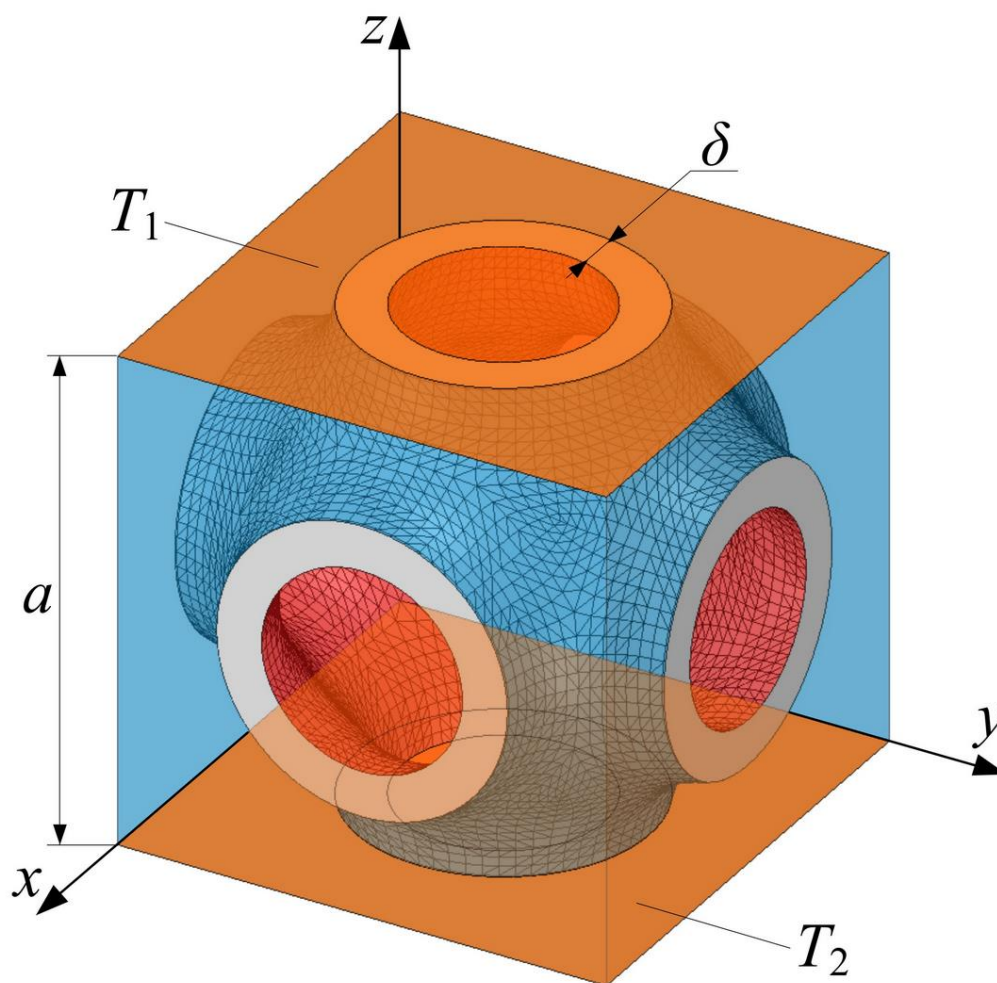


Рис. 2. Схема задачи

Таблица 1. Теплопроводность исследуемых материалов

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·°C)
Воздух	0,0242
Алюминий	202,4

Сетка для решения задачи методом конечных элементов изображена на рис. 3 и состоит из ≈ 3 млн. ячеек. При проведении оценки сеточной сходимости было определено, что указанной сетка позволяет получить достоверные результаты моделирования.

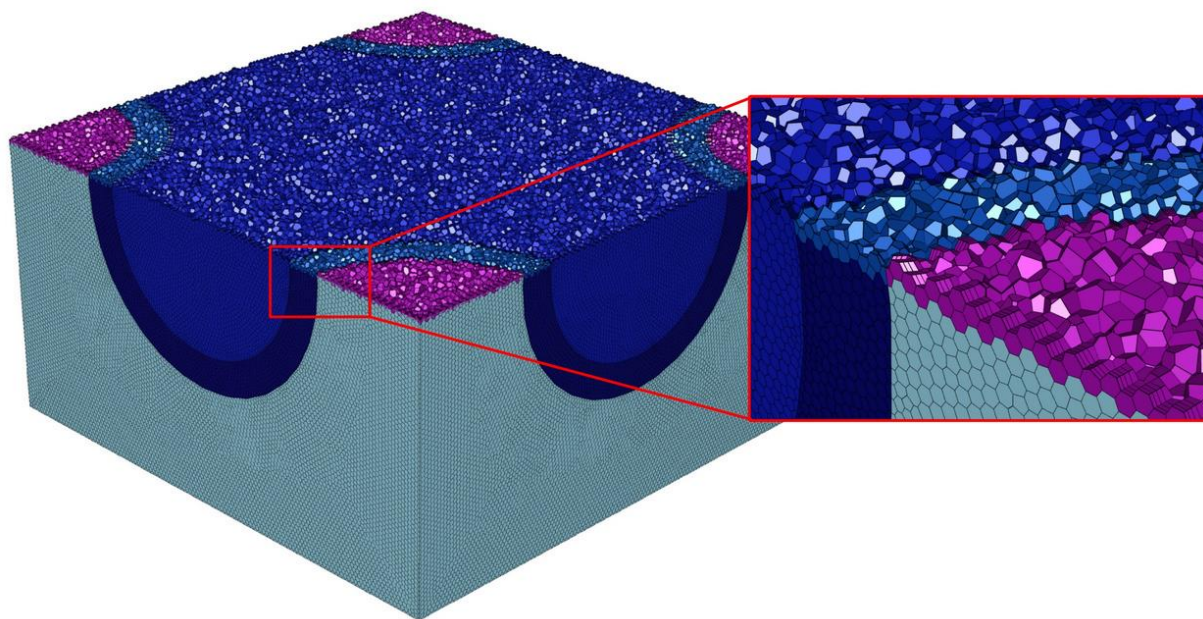


Рис. 3. Конечно-элементная сетка для решения задачи в ANSYS Fluent

Результаты. В результате численного моделирования теплопроводности кубической ячейки TPMS Шварца Р с учетом конвекции были получены значения плотности теплового потока на поверхностях, где задаются граничные условия первого рода. Теплопроводность ячейки определяется согласно закону Фурье:

$$\lambda = \frac{qa}{(T_2 - T_1)}. \quad (1)$$

График на рисунке 4 иллюстрирует зависимость теплопроводности решетки от толщины стенки. Из графика видно, что теплопроводность TPMS материала при учёте конвекции на 1,2% выше теплопроводности без учета воздуха. Также можно отметить линейную зависимость теплопроводности от толщины стенки в исследуемом диапазоне δ .

В ходе численного решения также были получены контуры распределения скорости в различных сечениях ячейки (рис. 5). На рисунке хорошо видно перемещение воздушных масс внутри ячейки.

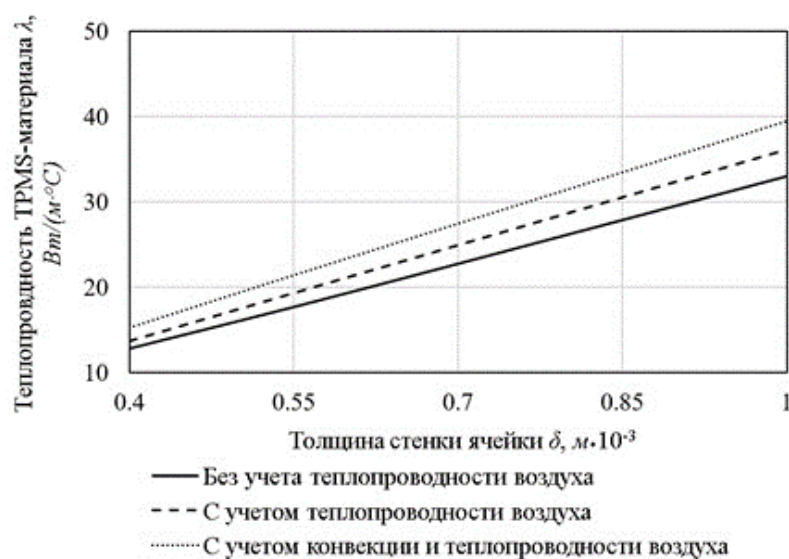


Рис. 4. Зависимость теплопроводности TPMS материала от толщины стенки

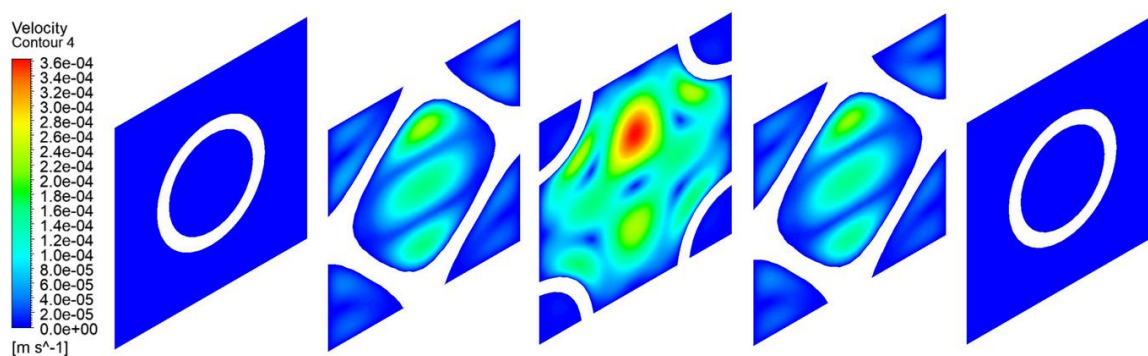


Рис. 5. Контуры скорости в ячейке TPMS Шварца Р

Выводы. В работе выполнено исследование теплопроводности пористого материала, основанного на TPMS Шварца Р с учётом конвекции воздуха в межпоровом пространстве. Получена зависимость теплопроводности от толщины стенки ячейки. Исходя из анализа результатов можно заключить, что теплопроводность линейно зависит от толщины стенки при постоянной длине ребра куба в исследуемом диапазоне δ . Важно отметить, что полученные зависимости справедливы исключительно для материалов, указанных в таблице 1. Для получения обобщенных зависимостей необходимо более детальное исследование теплопроводности и конвекции внутри ячеек, изготовленных из различных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kumar, P. C. M. A review on triple tube heat exchangers / P. C. M. Kumar, V. Hariprasath // Materials Today: Proceedings. – 2020. – V. 21. – P. 584-587.
2. Comparative analysis of compact heat exchangers for application as the intermediate heat exchanger for advanced nuclear reactors / N. Bartel [et al.] // Annals of Nuclear Energy. – 2015. – V. 81. – P. 143-149.
3. Intensification of heat exchanger performance utilizing nanofluids / H. M. Maghrabie [et al.] // International Journal of Thermofluids. – 2021. – V. 10. – P. 100071.
4. Recent research contributions concerning use of nanofluids in heat exchangers: a critical review / M. Bahiraei [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2018. – V. 133. – P. 137-159.

5. Kim, Y. Evaporation heat transfer characteristics of low GWP refrigerants in plate heat exchangers / Y. Kim, D. C. Lee // 25th IIR International Congress of Refrigeration, ICR 2019. – International Institute of Refrigeration, 2019. – P. 154-157.
6. Experimental analysis of heat transfer and friction factor in plate heat exchanger with different orientations using al₂o₃ nanofluids / G. Singh [et al.] // International Journal of Engineering. – 2016. – V. 29. – №. 10. – P. 1450-1458.
7. Attarzadeh, R. Multi-objective optimization of TPMS-based heat exchangers for low-temperature waste heat recovery / R. Attarzadeh, S. H. Attarzadeh-Niaki, C. Duwig // Applied Thermal Engineering. – 2022. – V. 212. – P. 118448.
8. Attarzadeh, R. Design analysis of the “Schwarz D” based heat exchanger: A numerical study / R. Attarzadeh, M. Rovira, C. Duwig // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – V. 177. – P. 121415.
9. Li, W. Heat transfer enhancement of water-cooled triply periodic minimal surface heat exchangers / W. Li, W. Li, Z. Yu // Applied Thermal Engineering. – 2022. – V. 217. – P. 119198.
10. Topological design, mechanical responses and mass transport characteristics of high strength-high permeability TPMS-based scaffolds / Z. Liu [et al.] // International Journal of Mechanical Sciences. – 2022. – V. 217. – P. 107023.
11. Compression Performance and Failure Analysis of 3D-Printed Carbon Fiber/PLA Composite TPMS Lattice Structures / M. Saleh [et al.] // Polymers. – 2022. – V. 14. – №. 21. – P. 4595.
12. Ahmed, N. Numerical Investigation on the Effect of Residual Stresses on the Effective Mechanical Properties of 3D-Printed TPMS Lattices / N. Ahmed, I. Barsoum, R. K. Abu Al-Rub // Metals. – 2022. – V. 12. – №. 8. – P. 1344.
13. Векторное распределение скорости в элементарной ячейке поверхности Шена I-WP / Д. М. Брагин, А. И. Попов, С. А. Зинина [и др.] // Уральский научный вестник. – 2022. – Т. 3, № 1. – С. 66-72. – EDN OKEGQT.
14. Numerical Study of Hydrodynamic Characteristics of Porous Material Based on Schwarz P Surface / A. V. Eremin [et al.] // 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – IEEE, 2021. – P. 1030-1032.
15. Распределение векторного поля скорости внутри элементарной ячейки поверхности Шварца типа P / Д. М. Брагин, А. И. Попов, С. А. Зинина, С. С. Леонов // Наукосфера. – 2021. – № 7-2. – С. 253-256. – EDN IFGQZU.
16. Dutkowski, K. Review of the State-of-the-Art Uses of Minimal Surfaces in Heat Transfer / K. Dutkowski, M. Kruzel, K. Rokosz // Energies. – 2022. – V. 15. – №. 21. – P. 7994.
17. Определение эффективного коэффициента теплопроводности пористого материала с упорядоченной структурой, основанной на ТПМП I-WP / А. И. Попов, Д. М. Брагин, С. А. Зинина [и др.] // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2022. – Т. 7, № 3-1(25). – С. 61-67. – EDN HXUZHS.
18. Analysis on the convective heat transfer process and performance evaluation of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) based on Diamond, Gyroid and Iwp / W. Tang [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2023. – V. 201. – P. 123642.
19. Брагин, Д. М. Исследование теплоизоляционных свойств композиционного материала с структурой ТПМП / Д. М. Брагин, С. А. Зинина, А. В. Еремин // Наукосфера. – 2021. – № 11-2. – С. 120-124. – EDN FWDDRP.
20. Yeranee, K. Review of Recent Investigations on Flow and Heat Transfer Enhancement in Cooling Channels Embedded with Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS) / K. Yeranee, Y. A. Rao // Energies. – 2022. – V. 15. – №. 23. – P. 8994.
21. Hsieh, M. T. Minisurf—A minimal surface generator for finite element modeling and additive manufacturing / M.T. Hsieh, L. Valdevit // Software Impacts. – 2020. – V. 6. – P. 100026.
22. TPMS Designer: A tool for generating and analyzing triply periodic minimal surfaces / A Jones [et al.] // Software Impacts. – 2021. – V. 10. – P. 100167.
23. Rajagopalan, S. Schwarz meets Schwann: design and fabrication of biomorphic and durataxic tissue engineering scaffolds / S. Rajagopalan, R. A. Robb // Medical image analysis. – 2006. – V. 10. – №. 5. – P. 693-712.
24. Brakke, K. A. The surface evolver / K. A. Brakke // Experimental mathematics. – 1992. – V. 1. – №. 2. – P. 141-165.
25. Brakke, K. A. Surface evolver manual / K. A. Brakke // Mathematics Department, Susquehanna University, Selinsgrove, PA. – 1994. – V. 17870. – №. 2.24. – P. 20.

Поступила в редакцию 06.09.2023 г., рекомендована к печати 21.09.2023 г.

DETERMINATION OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF A MATERIAL WITH AN ORDERED STRUCTURE BASED ON A SCHWARTZ P TRIPLY PERIODIC MINIMAL SURFACE WITH CONVECTION

Popov A.I., Bragin D.M., Zinina S.A., Eremin A.V.

In this paper, we studied the thermal conductivity of a porous material with an ordered structure based on a Schwartz P triply periodic minimal surface, taking into account the convection of air filling the cavities inside the lattice. The study was conducted for one elementary TPMS cell. To solve the interrelated problem of heat and mass transfer, the Fluent module of the ANSYS software package was used in the work. The properties of a unit cell with a cube edge length $a=10$ mm and wall thicknesses $0.4<\delta<1$ mm were studied. In the course of the work, it was determined that the thermal conductivity of the porous TPMS material has a linear dependence on the thickness of the cell wall. The study is of both scientific and applied importance, since it opens up the possibility of a more detailed prediction of the heat-conducting properties of porous TPMS materials.

Keywords: thermal conductivity, finite element method, ANSYS, minimal surface, TPMS.

Попов Андрей Игоревич

ассистент кафедры «Промышленная теплоэнергетика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: pixinot@icloud.com

Popov Andrei Igorevich

Assistant at Department of Industrial Heat Power Engineering of Samara State Technical University,
Russian Federation, Samara.

Брагин Дмитрий Михайлович

ассистент кафедры «Промышленная теплоэнергетика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: dimabragin2204@yandex.ru

Bragin Dmitrii Mikhailovich

Assistant at Department of Industrial Heat Power Engineering of Samara State Technical University,
Russian Federation, Samara.

Зинина Софья Алексеевна

ассистент кафедры «Промышленная теплоэнергетика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: sofazinina4@gmail.com

Zinina Sofia Alekseevna

Assistant at Department of Industrial Heat Power Engineering of Samara State Technical University,
Russian Federation, Samara.

Еремин Антон Владимирович

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,
Российская Федерация, г. Самара.
E-mail: a.v.eremin@list.ru

Eremin Anton Vladimirovich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Industrial Heat Power Engineering of Samara State Technical University,
Russian Federation, Samara.

УДК 621.182

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПРИСОСОВ ВОЗДУХА В КОТЕЛ

© 2023 Бирюков А.Б., Гнитиёв П.А.

В данной работе разработана универсальная методика диагностики присосов в котел с учетом возможного недожога топлива, позволяющая анализировать неосушенные продукты сгорания. В основе предложенной методики лежит использование расчета сжигания газообразного топлива. С помощью предлагаемой методики появляется возможность решения задачи идентификации значения коэффициента расхода воздуха. Также для исследования параметрической чувствительности проведен ряд численных экспериментов.

Ключевые слова: коэффициент расхода воздуха, идентификация, продукты сгорания, параметрическая чувствительность.

Введение. При диагностировании тепловой работы котельных агрегатов одной из важных задач является идентификация итогового коэффициента расхода воздуха, формируемого с учетом присосов холодного воздуха. Проблема заключается в том, что расход продуктов сгорания, покидающих котельный агрегат, не измеряется. Общепринятым подходом для решения этой задачи является использование специальных расчетных зависимостей, с помощью которых на основании значений измеренных концентраций некоторых компонентов продуктов сгорания определяется значение итогового коэффициента расхода воздуха.

При проведении теплотехнических испытаний (оценке эффективности работы печей и котлов) или их наладке необходима идентификация коэффициента расхода воздуха α по известному составу отходящих газов, определяемому при помощи газового анализа. Особенность применяемых в настоящее время расчетных зависимостей заключается в том, что аргументами для их использования являются концентрации компонентов в осушенных продуктах сгорания [1]. Эта особенность является существенным недостатком, поскольку значительный интерес представляет собой идентификация α на основании анализа состава неосушенных продуктов сгорания в реальном времени.

В работе [2] представлена система диагностики, базирующаяся на расчетной обработке результатов оперативного измерения состава продуктов сгорания и их температуры до и после рекуператора. Даная разработка направлена на диагностирование состояния теплообменной поверхности рекуператора путем идентификации текущих значений коэффициента рекуперации и их сопоставления с соответствующими эталонными кривыми. В качестве одного из элементов данной системы является идентификация реального расхода продуктов сгорания через рекуператор, а значит и итогового значения α . Но при этом не учитывается возможность недожога и его влияния на идентифицируемое значения α .

Постановка задачи. Целью данной работы является разработка универсального метода диагностирования присосов в котел с учетом возможного недожога топлива, позволяющего анализировать неосушенные продукты сгорания.

В основе предлагаемой методики, как и в работе [2] лежит использование методики расчета сжигания газообразного топлива, в рамках которой определяются:

Исследование выполнено в рамках научной темы «Повышение энергоэффективности выработки, транспортировки и потребления тепловой энергии» код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией): FRRF-2023-0003 регистрационный номер: 1023031000013-2-2.2.3.

- теоретически необходимое количество кислорода для сжигания 1 м³ природного газа;
- теоретически необходимое количество влажного воздуха для сжигания 1 м³ природного газа;
- действительное количество влажного воздуха для сжигания 1 м³ природного газа;
- выход компонентов при сжигании 1 м³ природного газа;
- общее количество продуктов сгорания при сжигании 1 м³ природного газа;
- процентный состав продуктов сгорания.

Безусловно, что при такой расчетной схеме влияние диссоциации CO₂ и H₂O не учитываются. Однако с учетом того, что кинетика физико-химических процессов в факеле не рассматривается, а интерес представляет собой состав продуктов сгорания в районе дымовой трубы такое упрощение является вполне справедливым.

В то же время в случае неполного горения топлива, необходимо учесть, что часть СО не окислится до CO₂ и неизрасходованным окажется количество кислорода, соответствующее половине объема, не окисленного СО (по сравнению со случаем полного сжигания топлива при прочих равных условиях) согласно стехиометрическому уравнению реакции горения. Если известна концентрация СО, измеренная при помощи соответствующего датчика, то объем СО, присутствующего в продуктах сгорания, соответствующих сжиганию 1 м³ топлива составит:

$$V_{CO} = \frac{\frac{\%CO}{100} \cdot V_{ПС}^P}{1 - \frac{\%CO}{2 \cdot 100}}$$

где $V_{ПС}^P$ – расчетное значения объема продуктов сгорания (без учета недожога), соответствующее сжиганию 1 м³ природного газа, м³/м³.

Тогда действительное значение объема кислорода в продуктах сгорания, соответствующее сжиганию 1 м³ природного газа, составит:

$$V_{O_2} = V_{O_2}^P + \frac{V_{CO}}{2},$$

где $V_{O_2}^P$ – расчетное значение объема кислорода в продуктах сгорания, соответствующее полному сжиганию 1 м³ природного газа, м³/м³.

Действительное значение объема продуктов сгорания, соответствующее сжиганию 1 м³ природного газа, определяется из следующего выражения:

$$V_{ПС} = V_{ПС}^P + \frac{V_{CO}}{2},$$

Действительная концентрация кислорода в продуктах сгорания составит:

$$\%O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{ПС}}.$$

На базе названных выше элементов стандартной методики расчета горения газообразного топлива с учетом предложенных зависимостей, учитывающих наличие недожога, создается расчетная процедура, которая для заданного состава газа, коэффициента расхода воздуха и заданного значения концентрации монооксида

углерода, выполняет расчет горения топлива и, в частности, определяет концентрацию остаточного кислорода в продуктах сгорания.

С помощью этого инструмента появляется возможность решения задачи идентификации значения коэффициента расхода воздуха. В результате измерения известна концентрация кислорода на исследуемом участке дымового тракта $\%O_2^{изм}$. Для решения задачи используется метод половинного деления [3]. Задаются два предварительных значения коэффициента расхода воздуха: α_1 и α_2 , для первого из которых $\%O_2(\alpha_1)$ заведомо меньше $\%O_2^{изм}$, а для второго – заведомо больше. В качестве α_1 можно задавать либо $\alpha=1$ (для которой $C_{O_2}=0$), либо действительное значение коэффициента расхода воздуха, подаваемого на горелки.

Далее определяем среднее арифметическое значение коэффициента расхода воздуха как $\alpha_3 = (\alpha_1 + \alpha_2)/2$. После чего вычисляется разность $\%O_2(\alpha_3) - \%O_2^{изм}$. Та из величин α_1 или α_2 , для которой разность соответствующей расчетной концентрации кислорода и $C_{O_2}^P$ имеет такой же знак как для α_3 , отбрасывается из рассмотрения. Дальнейшие вычисления производятся для двух оставшихся коэффициентов расхода воздуха. Эта процедура повторяется до тех пор, пока разность коэффициентов расхода воздуха, определенных на двух соседних итерациях, не окажется меньше заданной погрешности расчета: $|\alpha_{i+1} - \alpha_i| < \varepsilon$.

Окончательно установленное значение коэффициента расхода воздуха считаем равным $\alpha_p = (\alpha_{i+1} + \alpha_i)/2$.

Исследование параметрической чувствительности предложенной методики проведено для природного газа, состав которого приведен в таблице 1.

Таблица 1. Состав газа

Компонент	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	CO ₂	N ₂	O ₂	d _v , г/м ³
Содержание, %	2,0	0,6	93,0	0,4	0,3	3,0	0,7	18

Для исследования параметрической чувствительности разработки проведен ряд численных экспериментов. Влияние погрешности определения концентрации кислорода при отсутствии недожога исследовано для малого и высокого уровней концентрации кислорода в продуктах сгорания.

Для случая с малой концентрацией кислорода в продуктах сгорания исходными данными для численных экспериментов выступили следующие параметры:

- монооксид углерода в продуктах сгорания отсутствует;
- концентрация кислорода – 2,5%;
- истинные значения коэффициента расхода воздуха $\alpha=1,154$.

Изучено влияние погрешности определения концентрации кислорода на идентифицируемое значение α . Результаты исследования представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты исследования влияния погрешности определения концентрации кислорода при его низком содержании в продуктах сгорания

	Погрешность определения концентрации кислорода, %				
	1	2	3	4	5
Идентифицированное значение α	1,1558	1,1575	1,1592	1,1610	1,1682
Относительная погрешность определения α , %	0,156	0,303	0,455	0,607	0,765

В результате установлено, что при низком содержании кислорода в продуктах сгорания с ростом погрешности определения концентрации кислорода возрастает идентифицируемое значение коэффициента расхода воздуха, при этом относительная погрешность его определения также увеличивается. Зависимость относительной погрешности идентификации α от погрешности определения концентрации кислорода практически линейная и составляет около 0,156% на 1%.

Для случая с высокой концентрацией кислорода в продуктах сгорания исходными данными для численных экспериментов выступили следующие значения параметров:

- монооксид углерода в продуктах сгорания отсутствует;
- концентрация кислорода – 6,377%;
- истинное значения коэффициента расхода воздуха $\alpha=1,5$.

Изучено влияние погрешности определения концентрации кислорода на идентифицируемое значение α . Результаты исследования представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты исследования влияния погрешности определения концентрации кислорода при его высоком содержании в продуктах сгорания

	Погрешность определения концентрации кислорода, %				
	1	2	3	4	5
Идентифицированное значение α	1,5074	1,15147	1,15221	1,5296	1,5372
Относительная погрешность определения α , %	0,493	0,980	1,473	1,973	2,48

В результате установлено, что при высоком содержании кислорода в продуктах сгорания с ростом погрешности определения концентрации кислорода возрастает идентифицируемое значение коэффициента расхода воздуха, при этом относительная погрешность его определения также увеличивается. Зависимость относительной погрешности идентификации α от погрешности определения концентрации кислорода практически линейная и составляет около 0,49% на 1%.

В то же время важным является определение погрешности идентификации значения коэффициента расхода воздуха для случая, когда существующий недожог не учитывается. Соответствующее исследование проведено для малых и больших значений концентраций кислорода в продуктах сгорания.

Для первого случая (малая концентрация кислорода в продуктах сгорания, на уровне 2,5%), когда в продуктах сгорания присутствует монооксид углерода кажущееся значение коэффициента расхода воздуха (при не учёте наличия монооксида углерода) составляет $\alpha=1,154$. Изучено влияние не учёта наличия монооксида углерода на идентифицируемое значение α . Результаты исследования представлены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты исследования влияния не учёта наличия монооксида углерода в продуктах сгорания при низких концентрациях кислорода

	Значение концентрации CO, %				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Истинное значение α	1,1505	1,1472	1,1437	1,1404	1,1371
Относительная погрешность определения α , %	0,303	0,589	0,899	1,179	1,464

В результате установлено, что при низком содержании кислорода в продуктах сгорания при не учёте недожога топлива с ростом реальной концентрации CO происходит завышение идентифицируемого значения коэффициента расхода воздуха,

при этом относительная погрешность его определения также увеличивается. Зависимость относительной погрешности идентификации α от величины реальной концентрации СО практически линейная и составляет около 2,9% на 1%.

Для второго случая (высокая концентрация кислорода в продуктах сгорания, на уровне 6,377%), когда в продуктах сгорания присутствует монооксид углерода кажущееся значение коэффициента расхода воздуха (при не учете наличия монооксида углерода) составляет $\alpha=1,5$. Изучено влияние не учета наличия монооксида углерода на идентифицируемое значение α . Результаты исследования представлены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты исследования влияния не учета наличия монооксида углерода в продуктах сгорания при высоких концентрациях кислорода

	Значение концентрации СО, %				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Идентифицированное значение α	1,4948	1,4895	1,4842	1,4790	1,4738
Относительная погрешность определения α , %	0,347	0,7	1,053	1,4	1,747

В результате установлено, что при высоком содержании кислорода в продуктах сгорания при не учете недожога топлива с ростом реальной концентрации СО происходит завышение идентифицируемого значения коэффициента расхода воздуха, при этом относительная погрешность его определения также увеличивается. Зависимость относительной погрешности идентификации α от величины реальной концентрации СО практически линейная и составляет около 3,4% на 1%.

Также проведено исследование влияния погрешности определения концентрации монооксида углерода на идентифицируемое значение коэффициента расхода воздуха, Исследование проводилось для следующих условий:

- концентрация кислорода – 2,5%;
- концентрация монооксида углерода в продуктах сгорания – 2,5%;
- истинное значение коэффициента расхода воздуха $\alpha=1,137$,

Изучено влияние погрешности определения концентрации монооксида углерода на идентифицируемое значение α . Результаты исследования представлены в таблице 6.

Таблица 6. Результаты исследования влияния погрешности определения концентрации монооксида углерода на идентифицируемое значение коэффициента расхода воздуха

	Погрешность определения концентрации СО, %				
	1	2	3	4	5
Идентифицированное значение α	1,1369	1,1367	1,1365	1,13631	1,13615
Относительная погрешность определения α , %	0,009	0,026	0,044	0,062	0,075

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что с ростом погрешности определения концентрации СО возрастает идентифицируемое значение коэффициента расхода воздуха, при этом относительная погрешность его определения также увеличивается. Так, например, идентифицированное значение α при погрешности определения концентрации СО на уровне 5% отличается от аналогичного при погрешности на уровне 1% на 0,066% (крайние значения в таблице 6). При этом увеличение относительной погрешности определения α происходит в 8,3 раза. В то же время следует отметить очень низкий уровень влияния погрешности определения концентрации СО на идентифицируемое значение α .

Выводы. В данной работе разработана универсальная методика диагностирования присосов воздуха в котельный агрегат с учетом возможного недожога топлива, позволяющая анализировать неосушенные продукты сгорания. В основе предложенной методики лежит использование расчета сжигания газообразного топлива со специально разработанными дополнениями. С помощью предлагаемой методики появляется возможность решения задачи идентификации значения коэффициента расхода воздуха и оценки газоплотности элементов котельного агрегата и дымового тракта. Проведенное исследование параметрической чувствительности разработки показало, что при умеренном недожоге (до 0,5% CO) его не учет приводит к погрешностям идентификации коэффициента расхода воздуха до 2%, что приемлемо в ряде случаев. Установлено очень малое влияние погрешности определения концентрации CO на идентифицируемое значение α .

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гришко, Б. М. Практикум по расчету горения топлива : учебное пособие / Б. М. Гришко, П. А. Трубаев. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 140 с.
2. Бирюков, А. Б. Диагностика тепловой работы печного рекуператора / А. Б. Бирюков // Сталь. – 2019. – № 2. – С. 70-73.
3. Овсянникова, Н. И. Численные методы : учебное пособие / Н. И. Овсянникова. – М. : ИД Академии Жуковского, 2021. – 84 с.

Поступила в редакцию 11.09.2023 г., рекомендована к печати 21.09.2023 г.

DIAGNOSIS OF AIR SUCTION IN THE BOILER

Biriukov A.B., Gnitiev P.A.

In this paper, a universal method for diagnosing suction cups in the boiler is developed, taking into account the possible fuel underburning. This method makes it possible to analyze the undried combustion products. The proposed method is based on the use of gaseous fuel combustion calculation. With the help of the proposed method, it becomes possible to solve the problem of identifying the value of the air flow coefficient. Also, to study the parametric sensitivity of the development, a number of numerical experiments were carried out.

Keywords: air flow coefficient, identification, combustion products, parametric sensitivity.

Бирюков Алексей Борисович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики, проректор ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: birukov.ttf@gmail.com

Biriukov Aleksei Borisovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technical Thermophysics, Vice-rector of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Гнитиёв Павел Александрович

кандидат технических наук, заместитель декана факультета металлургии и теплоэнергетики, доцент кафедры технической теплофизики ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: gnitiev.pavel@gmail.com

Gnitiev Pavel Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Deputy Dean of the Faculty of Metallurgy and Thermal Power Engineering, Associate Professor of the Department of Technical Thermal Physics of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 621.437+620.97

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЛЕГКИХ КОММЕРЧЕСКИХ АВТОМОБИЛЕЙ

© 2023 *Горожанкин С.А., Савенков Н.В.*

В работе исследованы возможности повышения топливной экономичности транспортных средств категории N1 для городского ездового цикла по ГОСТ Р 41.101-99 путем установки дополнительной обратимой электрической машины в составе силовой установки. Это позволяет за счет согласования режимов работы ДВС и электрического двигателя снизить расход топлива при эксплуатации таких автомобилей в городских условиях. В качестве критерия эффективности процесса движения рассмотрены такие показатели как расход топлива в рассмотренном ездовом цикле. Результаты получены на примере модельного ряда автомобилей семейства «Соболь».

Ключевые слова: автомобиль, гибридная силовая установка, ездовой цикл, расход топлива.

Введение. В настоящее время неуклонно расширяется использование в городах автотранспортных средств с электрическими двигателями, а также гибридными силовыми установками. Это позволяет существенно уменьшить выбросы ингредиентов продуктов сгорания тепловых двигателей, загрязняющих атмосферу, а также в значительной мере сократить расход невозобновляемых органических топлив нефтяного происхождения. Применение вышеперечисленных силовых установок характерно преимущественно для легковых автомобилей. В то же время непрерывно увеличивается относительная доля легкого коммерческого транспорта, причем две трети таких автомобилей, используемых в странах СНГ, выпущено предприятиями автомобильной промышленности Российской Федерации. Среди них доминирует ГАЗ - крупный производитель микроавтобусов, легковых и грузовых автомобилей.

В процессе перевозок в городах предпочтение отдается автотранспортным средствам, грузоподъемностью до 1,5 тонны, к которым относятся автомобили «Соболь» и «Газель». Однако их эксплуатация сопровождается значительным количеством вредных выбросов, особенно при работе таких автомобилей в закрытых помещениях (склады, торговые центры, крытые рынки и др.). Перечисленные обстоятельства определили настоятельную потребность в создании конструкций автомобилей с гибридными силовыми установками. Представляется целесообразным и возможным установка на указанных автомобилях дополнительных агрегатов с целью снижения загрязнения окружающей среды.

Постановка задачи. Целью данной работы является исследование возможности применения гибридной силовой установки в вышеперечисленных моделях автомобилей, а также рациональный выбор режимов ее работы, обеспечивающих минимальный путевой расход топлива.

Базовой моделью автомобилей ГАЗ «Соболь» является фургон ГАЗ-2752 в 3-местном варианте или 7-местном грузо-пассажирском варианте «Комби» [1].

Среди этих автомобилей выпускаются их полноприводные варианты с жёстким передним мостом и карданными шарнирами в приводе передних ведущих колёс. Именно такие автомобили являются наиболее подходящими для установки на них

дополнительного тягового вентильного электродвигателя в качестве привода переднего ведущего моста без установки раздаточной коробки. Этот электродвигатель в процессе разгона и движения обеспечивает передачу дополнительно мощности движителю (ведущим колесам). Энергия к нему передается от специальной аккумуляторной батареи через соответствующий преобразователь (инвертор). На валу привода также может быть установлен электрогенератор, предназначенный для пополнения заряда аккумуляторной батареи в процессе замедления автомобиля.

Более целесообразным представляется установка единой обратимой электромашины переменного тока, которая в процессах замедления и торможения может переключаться в режим генератора с целью использования кинетической энергии автомобиля для зарядки аккумулятора.

Для тягового режима такого автомобиля уравнение баланса мощности [2] приобретает вид:

$$N_{ДВС}(V, j, i) = \left(V \left((\psi + i) \cdot m_a g + \frac{c_x \rho}{2} F V^2 + m_a j \right) + \frac{(J_K n_k + J_{КП} U_{ГП}^2) j \cdot V}{r_k^2} \right) / \eta_{тр.ДВС} - N_{эл.дв.} \cdot \eta_{тр.эл.} \quad (1)$$

В приведенном выражении:

$N_{ДВС}$ – текущее значение эффективной мощности двигателя внутреннего сгорания;

V – скорость движения автомобиля;

j – продольное ускорение автомобиля;

ψ – коэффициент трения качения;

$i = \tan(\alpha)$ – продольный уклон дороги в зависимости от угла уклона α ;

m_a – масса автомобиля;

g – ускорение земного тяготения;

c_x – коэффициент лобового сопротивления автомобиля;

ρ – плотность воздуха;

F – площадь миделевого сечения автомобиля;

n_k – частота вращения карданного вала;

$U_{ГП}$ – передаточное число главной передачи;

$U_{КП}$ – передаточное число включенной передачи в коробке передач;

r_k – кинематический радиус качения колеса;

J_K – момент инерции вращающихся частей одного колеса;

n_k – общее количество колес на автомобиле;

$J_{КП}$ – момент инерции карданной передачи;

$N_{эл.дв.}$ – эффективная мощность электродвигателя (на его валу);

$\eta_{тр.эл.}$ – КПД трансмиссии от электродвигателя к движителю (передним колесам автомобиля);

$\eta_{тр.ДВС}$ – КПД трансмиссии от ДВС к движителю (задним ведущим колесам).

С учетом того, что моменты инерции вышеперечисленных вращающихся элементов (J_K и $J_{КП}$) сравнительно невелики, причем их накопленная в процессе разгона кинетическая энергия может быть практически полностью возвращена (с учетом КПД трансмиссии) в процессе замедления при переводе электродвигателя в режим электрогенератора, выражение (1) для движения автомобиля по горизонтальному участку дороги возможно упростить и представить как:

$$N_{ДВС}(V, j) = V \left(\psi m_a g + \frac{c_x \rho}{2} F V^2 + m_a j \right) / \eta_{тр.ДВС} - N_{эл.дв.} \cdot \eta_{тр.эл.}$$

Приведенное выражение принято для расчета режимов разгона и движения с постоянной скоростью для всех участков в городском цикле на дороге. Для исследуемых автомобилей модели ГАЗ «Соболь» с конструкцией кузова «фургон», площадь миделевого сечения составляет 5 м², коэффициент аэродинамического сопротивления c_x равен 0.54. Остальные параметры приняты следующими: $m = 2600$ кг; $\psi = 0,016$; $\eta_{тр.ДВС} = 0,95$; $\eta_{тр.эл.} = 0,95$.

Значение мощности ДВС на всех режимах определялось в соответствии с известными зависимостями для расчета их частичных скоростных характеристик [3] по эффективной мощности и удельному расходу топлива.

Для движения по горизонтальному участку дороги в режиме торможения и работы электромашины в генераторном режиме уравнение баланса мощности за счет использования кинетической энергии автомобиля приобретает вид

$$N_{ген.}(V, j) = V \cdot \left(\psi m_a g + \frac{c_x \rho}{2} F V^2 + m_a j \right) \cdot (\eta_{тр.ген.} \cdot \eta_{ген.}).$$

В приведенном выражении:

$N_{ген.}$ – электрическая мощность генератора (на его клеммах);

$\eta_{тр.ген.}$ – КПД трансмиссии генератора;

$\eta_{ген.}$ – КПД генератора.

Мощность электродвигателя вычисляется в соответствии с выражением

$$N_{эл.дв.} = 0.10472 \cdot M_{эл.дв.} \cdot n_{эл.дв.}, \quad (2)$$

где: $M_{эл.дв.}$ – крутящий момент электродвигателя, Н*м;

$n_{эл.дв.}$ – частота вращения электродвигателя, мин⁻¹.

Крутящий момент современных синхронных электродвигателей, применяемых в гибридных силовых установках, в зависимости от их частоты вращения вычисляется из зависимости:

$$M_{эл.дв.} = M_{эл.дв.ном.} \cdot \overline{M}_{эл.дв.} \quad (3)$$

В последнем выражении $M_{эл.дв.ном.}$ – крутящий момент электродвигателя на номинальном режиме, а $\overline{M}_{эл.дв.}$ – относительный (безразмерный) крутящий момент электродвигателя. Аналитическое выражение для безразмерного крутящего момента электродвигателя имеет вид [5]:

$$\overline{M}_{эл.дв.} = 2.6778 - 2.5824 \cdot \overline{n} + 1.06398 \cdot \overline{n}^2 - 0.15948 \cdot \overline{n}^3 - 0.00014792 \cdot \overline{n}^4 \quad (4)$$

Приведенное выражение использовано для вычисления безразмерного крутящего момента электродвигателя в диапазоне относительных частот вращения $\overline{n}$ от 0.92 до 3.174. При $\overline{n} < 0.92$ принималось постоянное значение $\overline{M}_{эл.дв.} = 1.0782$.

Величина последнего в зависимости от относительной частоты $\overline{n}$ вращения графически представлена на рис. 1.



Рис. 1. Изменение безразмерного крутящего момента электродвигателя

Следует отметить, что характеристика крутящего момента электродвигателя благоприятна для повышения его «приспособляемости» в диапазоне относительных частот вращения от 0.92 до 3.172. Зависимости (2)-(4) применены также и для вычислений мощности синхронных электрических машин при их работе в режиме электрогенератора.

Изменение КПД электродвигателя в зависимости от степени его нагрузки k и частоты вращения n в процессе вычислений определялось по эмпирической формуле [5]:

$$\eta_{\text{эл.дв.}} = \left[1 + 0.893 \left(\frac{1}{\eta_{\text{ном}}} - 1 \right) \cdot \frac{0.12 \cdot \left(\frac{n \cdot \bar{n}}{n_{\text{ном}}} \right)^2 + k^2}{k \left(\frac{n \cdot \bar{n}}{n_{\text{ном}}} \right)} \right]^{-1},$$

где $\eta_{\text{ном}}$ – КПД электродвигателя на номинальном режиме;

k – коэффициент нагрузки по отношению к номинальному режиму;

$n_{\text{ном}}$ – номинальная частота вращения электродвигателя.

Для номинального режима величина КПД электромашины принята равной 0.9. Его зависимость от относительной частоты вращения и коэффициентов нагрузки приведена на рис. 2. Очевидно, что в области неполных нагрузок ($k = 0.4 \dots 0.8$) величина КПД превышает 0.9 при всех частотах вращения, превышающих номинальную. К сожалению, при частотах вращения ниже 0.5 от номинальной значение КПД существенно снижается до уровня ~0.7.

Мощность электродвигателя практически сохраняется в диапазоне относительных частот вращения $\bar{n}$ от 1 до ~2.5 при всех значениях его неполных нагрузок k , как это показано на рис. 3. Это позволяет обеспечить, при необходимости, зарядку аккумулятора при движении автомобиля с постоянной скоростью.

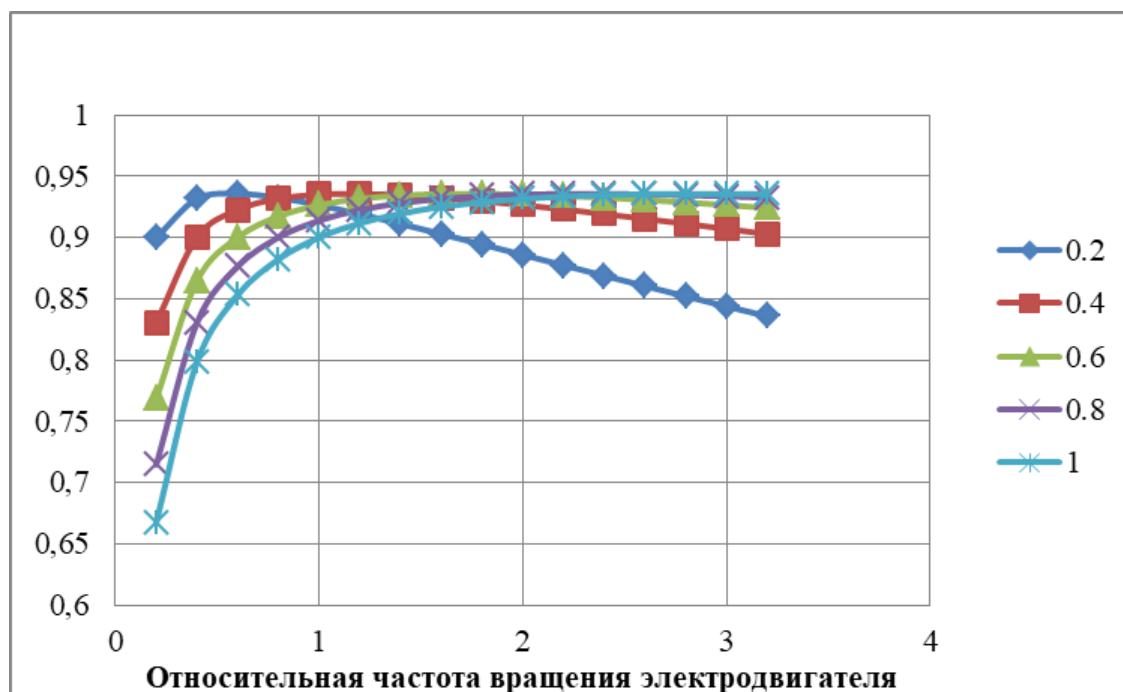


Рис. 2. Изменение КПД электродвигателя в зависимости от его нагрузки и частоты вращения

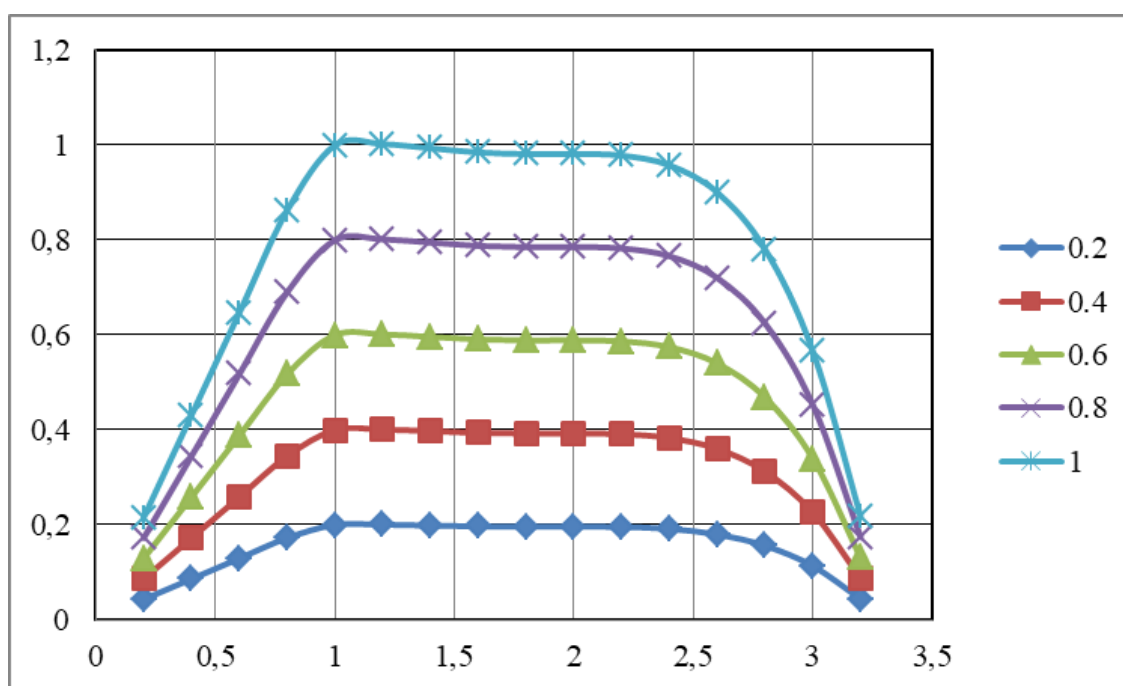


Рис. 3. Мощность, развиваемая электродвигателем как функция частоты вращения и нагрузки

Приведенные результаты для параметров электрических машин были использованы для оценки эффективности работы гибридной силовой установки исследуемого автомобиля.

При этом руководствовались следующими принципиальными требованиями:

1. Использовать мощность, развиваемую электродвигателем на режимах разгона и движения с постоянной скоростью, что позволяет уменьшить путь расход топлива.

2. Применить режим рекуперативного торможения путем перевода электромашины в генераторный режим с целью подзарядки аккумулятора.

3. Обеспечить в течение прохождения городского ездового цикла возвращение в аккумулятор той же энергии, которая была от него получена и использована при разгонах и движении с постоянной скоростью.

Энергия, отбираемая от аккумулятора в процессе работы электродвигателя на каждом из участков цикла в тяговом режиме, определяется зависимостью:

$$E_{акк.дв.} = \int_0^T \frac{N_{эл.дв.}}{\eta_{эл.дв.} \cdot \eta_{пр.эл.дв.}} dt ,$$

где $\eta_{пр.эл.дв.}$ – КПД преобразователя постоянного тока в переменный (инвертора) электродвигателя.

Энергия, передаваемая в аккумулятор в процессе его зарядки при работе электромашины в режиме генератора, определяется зависимостью:

$$E_{акк.ген.} = \int_0^T N_{ген.} \cdot \eta_{пр.ген.} \cdot \eta_{акк.} \cdot dt ,$$

где $\eta_{пр.ген.}$ – КПД преобразователя переменного тока в постоянный (выпрямителя) для генератора; $\eta_{акк.}$ – КПД процесса заряда-разряда аккумулятора.

Следует учитывать, что в электрических аккумуляторах накапливается (аккумулируется) только часть электрической энергии, переданная в них. В настоящее время наиболее совершенными являются литий-ионные аккумуляторы обладающие значениями КПД от 0.9 до 0.97, хотя верхняя граница многими подвергается сомнению. Это подтверждается необходимостью их охлаждения в процессе работы, поскольку многие из них оснащаются специальными жидкостными системами охлаждения. Разноречивы также данные о КПД электрогенераторов (от 0.85 до 0.9) и электродвигателей. Потери в кабельных линиях значительны вследствие больших величин рабочих токов. Этим объясняется повышение напряжения в электрических цепях до 650 В.

В проведенных расчетах значения $\eta_{пр.эл.дв.}$ и $\eta_{пр.ген.}$ были приняты равными 0.97, а КПД процесса заряда-разряда аккумулятора $\eta_{акк.} = 0.8$.

В исследованиях принималось, что в результате прохождения автомобилем всех участков простого городского цикла должно выполняться условие:

$$\left| \sum_1^n E_{акк.ген.} \right| = \left| \sum_1^m E_{акк.дв.} \right| .$$

В данном случае n – число участков, на которых используется электродвигатель, либо обратимая электромашина в режиме двигателя, m – число участков, на которых используется электрогенератор для зарядки аккумуляторов.

Схема движения автомобиля в простом городском цикле [6] приведена на рис.4. Цикл включает 23 участка, включая остановки автомобиля, сопровождающиеся работой двигателя на холостом ходу. Активные участки 2, 3, 4, 7, 9, 10, 11, 14, 16, 18, 19, 20, 21 и 22 обозначены на схеме цифрами. На участках 2, 3, 7, 9, 10, 14, 16, 18, 19 и 21 для движения используется электродвигатель, либо обратимая электромашина в режиме двигателя, а на участках 4, 11, 20 и 22 включается генератор, либо обратимая машина в режиме генератора.

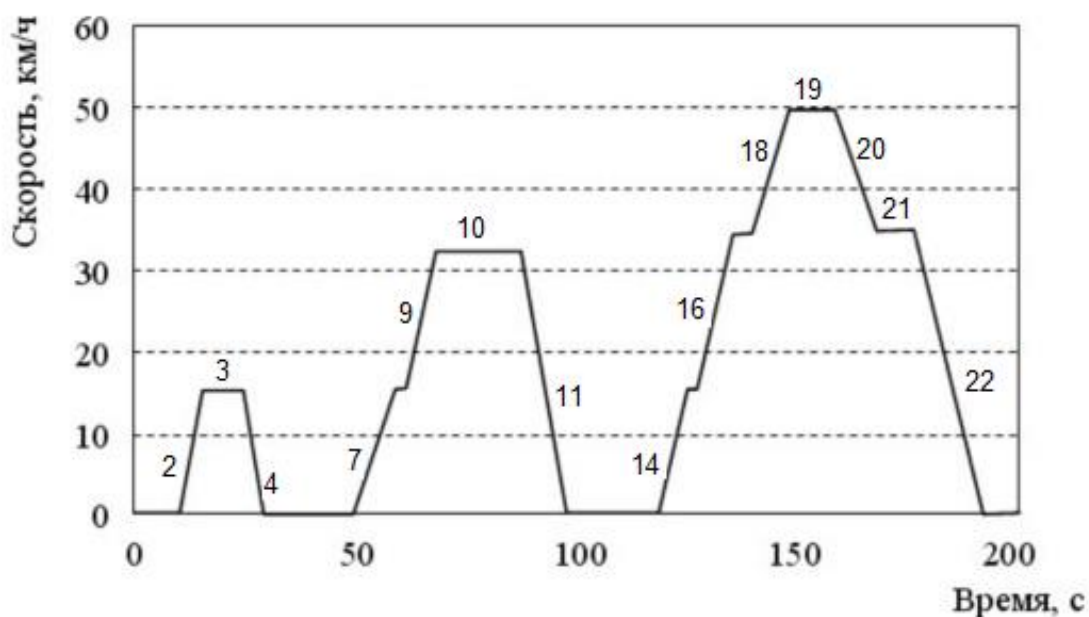


Рис. 4. Схема движения автомобиля в простом городском цикле

Для проведения вычислений параметров движения автомобиля и параметров его силовой установки создана специальная программа вычислений с применением ПЭВМ. Она разработана на языке программирования TurboC++ на базе комплекса программ, предназначенных для расчетов процессов движения автомобилей на неустановившихся режимах, созданных на кафедре АТСЭ ФГБОУ ВО «ДОННАСА». Работа программы осуществляется с применением программного обеспечения BorlandC++. Исходные параметры для расчетов приняты в соответствии с вышеприведенными характеристиками автомобиля и его двигателя внутреннего сгорания.

Алгоритм программы позволяет в соответствии с требованиями ГОСТ Р 41.101-99 (Правила ЕЭК ООН N 101) [6] для городского цикла на дороге для всех участков цикла, как показано на рисунке 1, вычислять любой момент времени в соответствии с текущими значениями скорости и ускорения автомобиля, параметры работы его двигателя в соответствии с номером включенной передачи.

В процессе имитации движения автомобиля для каждого элементарного участка движения в соответствии с зависимостью (1) вычисляется потребная тяговая мощность для автомобиля в зависимости от его массы, текущих значений мощности, развиваемой двигателями с учетом передаточных чисел включенной передачи и остальных элементов трансмиссии. Это дает возможность непрерывно вычислять текущие значения коэффициента использования мощности двигателя с целью недопущения перегрузок двигателя по частоте вращения и крутящему моменту. Параллельно проводится вычисление текущих значений как удельного, так и суммарного расходов топлива. В результате определяется суммарный расход топлива на каждом элементарном участке. Помимо этого вычисляется расход топлива для всего цикла в целом и, соответственно, средний путевой расход. В ходе вычислений временной шаг принимался в пределах 0,01...0,05 с, что позволило проводить вычисления с точностью до 4-х значащих цифр. Таким образом, программа позволяет имитировать динамику движения автомобиля с гибридной силовой установкой в городских условиях.

Полная кинетическая энергия движущегося автомобиля для четырех рассматриваемых участков торможения составляет 376 кДж. К сожалению, далеко не вся эта энергия может быть использована для зарядки аккумулятора. Диссипация этой энергии вследствие трения качения, аэродинамического сопротивления автомобиля, а также потери в генераторе и преобразователях позволяют использовать только 169.3 кДж этой энергии, т.е. около 45%. На практике эта величина, естественно уменьшится, т.к. торможение с применением штатной системы не позволит полностью использовать эту энергию.

Исследования и расчеты показали, что расход топлива автомобиля «Соболь» в городском цикле составляет 144.5 г при его эксплуатации с ДВС мощностью 79 кВт (107 л.с.). Установка на валу привода переднего моста обратимой электромашины мощностью ~14 кВт дает возможность снизить расход топлива до 134.5 г, т.е. на 6.9%. При этом предполагается, что в процессах замедления ДВС переводится в режим холостого хода. Расчетная мощность в режиме электродвигателя составила 2.04 кВт, а в режиме генератора ~14 кВт. Значительное превышение мощности в генераторном режиме обусловлено резким уменьшением КПД при значениях $\bar{n} < 0.2$. В то же время установка обратимой машины позволяет, в случае необходимости (например, при обгонах) увеличить тяговую мощность силовой установки на 14 кВт (19 л.с.), что весьма существенно.

Следует учесть, что в ходе цикла при остановках автомобиля общей продолжительностью 60 с двигатель внутреннего сгорания работает в режиме холостого хода. При этом фактический расход топлива на режимах движения составляет 120.5 г. при движении с использованием только ДВС. Соответственно для гибридной силовой установки этот расход снижается до 110.5 г, что соответствует экономии топлива на 8.3%.

Необходимо отметить, что движение в городском цикле предусматривает торможение автомобиля со скорости ~10 км/ч с применением штатных тормозов. Если рассматривать этот вариант, то энергия, которая может быть передана в аккумулятор, составляет 140.4 кДж, т.е. на 17% меньше. В этом случае используемая мощность электродвигателя должна составлять 1.69 кВт, но и мощность генератора может быть уменьшена до 8.6 кВт.

Таким образом, для достижения энергетического баланса в одном ездовом цикле необходимо обеспечить отдачу и последующее накопление электроэнергии ~170 кДж (0.047 кВт*ч). Для обеспечения пятикратного прохождения городского цикла без подзарядки аккумулятора и недопустимости его полной разрядки необходимая емкость должна составлять не менее 0.5. С учетом удельной мощности современных аккумуляторов 90-200 Вт*ч/кг [7] масса батареи таких аккумуляторов должна составить не менее 5 кг.

В то же время желательно применить аккумулятор существенно большей емкости, поскольку при работе нежелательны частые режимы работы с большим током отдачи, что снижает его долговечность. Увеличение емкости аккумулятора до ~5 кВт*ч (масса около 50 кг) позволит обеспечить непродолжительное движение автомобиля с невысокой скоростью на закрытых стоянках, в помещениях и цехах. Автомобиль в этом случае становится переднеприводным, а мощности электродвигателя 14 кВт вполне достаточно для перемещений и маневрирования.

Определенным недостатком остается возможность подзарядки аккумулятора лишь при движении автомобиля, либо от стационарной электросети на стоянке.

В настоящее время авторами исследуются вопросы использования более мощной обратной синхронной электромашины мощностью до ~40 кВт для обеспечения разгонов с использованием только ее в режиме электродвигателя. Это позволит при движении на участках с постоянной скоростью обеспечивать работу ДВС с меньшим удельным расходом топлива за счет повышения его коэффициента использования мощности при параллельной интенсивной зарядке аккумулятора. При этом, становится возможным оптимизация режимов работы силовой установки такого автомобиля не только в городском, но и в загородном циклах.

Выводы. 1. Полученные результаты дают основание рекомендовать рациональную компоновку силовой установки для малотоннажного грузового автомобиля ГАЗ «Соболь». Это потребует реконструкции ведущего переднего моста с установкой в его составе обратной электрической машины переменного тока, которая обеспечит дополнительную тяговую мощность при разгоне и движении автомобиля, а также зарядку аккумуляторов в процессах замедления и торможения. Установка блока аккумуляторных батарей возможна под кузовом автомобиля.

2. Установка дополнительных агрегатов, особенно блока аккумуляторных батарей приведет, несмотря на снятие раздаточной коробки, к незначительному увеличению массы автомобиля, что практически не изменит его грузоподъемность. Для таких автомобилей определяющим параметром, зачастую, является не грузоподъемность, а объемная вместимость.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Грузовик ГАЗ Соболь технические характеристики, комплектации и цены [сайт]. – URL: <https://www.drom.ru/catalog/lcv/gaz/sobol/> (дата обращения 01.08.2023)
2. Горожанкин, С. А. Расчет тяговоскоростных и топливноэкономических свойств автомобилей в современных эксплуатационных условиях : учебное пособие по дисциплине «Теория эксплуатационных свойств» для студентов направления подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортнотехнологических машин и комплексов» / С. А. Горожанкин, А. Д. Бумага, Н. В. Савенков. – Донецк : РА ДОН, 2019. – 244 с.
3. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / Д. Н. Вырубов, Н. А. Иващенко, В. И. Ивин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
4. Колчин, А. И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей : учеб. пособие для вузов. / А. И. Колчин, В. П. Демидов / 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2002. – 496 с.
5. Фираго, Б. И. Энергетические показатели синхронного частотно-регулируемого электропривода / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. Объединений СНГ. – 2018. – Т.61, №4. – С. 287-298.
6. ГОСТ Р 41.101-99 (Правила ЕЭК ООН №101). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения легковых автомобилей, оборудованных двигателем внутреннего сгорания, в отношении измерения объема выбросов диоксида углерода и расхода топлива, а также транспортных средств категории M1 и N1, оборудованных электроприводом, в отношении измерения расхода электроэнергии и запаса хода : государственный стандарт : издание официальное: принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 26 мая 1999 г. № 184 : введен впервые : дата вступления в силу 01.01.1997. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 37 с.
7. Таганова, А. А. Герметические химические источники тока: Элементы и аккумуляторы. Оборудование для испытаний и эксплуатации : справочник / А. А. Таганова, Ю. И. Бубнов, С. Б. Орлов. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2005. – 264 с.

Поступила в редакцию 14.08.2023, рекомендована к печати 31.08.2023 г.

STUDY OF THE ELECTRIC POWER PLANT FOR LIGHT COMMERCIAL VEHICLES

Gorozhankin S.A., Savenkov N.V.

The paper investigates the possibilities of improving the fuel efficiency of vehicles of category N1 for the urban driving cycle in accordance with GOST R 41.101-99 by installing an additional reversible electric machine as part of the power plant. This allows, by harmonizing the operating modes of the internal combustion engine and the electric motor, to reduce fuel consumption when operating such vehicles in urban environments. As a criterion for the efficiency of the driving process, indicators such as fuel consumption in the considered driving cycle are considered. The results are obtained on the example of the model range of cars of the Sobol family.

Keywords: car, hybrid power plant, driving cycle, fuel consumption.

Горожанкин Сергей Андреевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации ФГБОУ ВО «ДОННАСА», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: s.a.gorozhankin@donnasa.ru

Gorozhankin Sergey Andreevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Automotive Transport, Service and Operation of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Савенков Никита Владимирович

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации ФГБОУ ВО «ДОННАСА», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: n.v.savenkov@donnasa.ru

Savenkov Nikita Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automotive Transport, Service and Operation of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Russian Federation, DPR, Donetsk.

75-ЛЕТНЕМУ ЮБИЛЕЮ ВЛАДИМИРА ВАСИЛЬЕВИЧА ДАНИЛОВА



д-р техн. наук, профессор
Данилов Владимир Васильевич

2 июля текущего года отметил свой **75-летний юбилей** главный редактор журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки», заведующий кафедрой радиопизики и инфокоммуникационных технологий ДонГУ, доктор технических наук, профессор **Данилов Владимир Васильевич**.

Данилов В. В. – учёный в области оптоэлектронных информационных технологий, оптической обработки информации, автоматизированных систем и средств автоматизации, автор более 100 научных работ и 4 авторских свидетельств. Под его руководством защитили 1 докторскую и 5 кандидатских диссертаций.

В 1975 г. окончил Физический факультет Донецкого государственного университета по специальности «Радиофизика и электроника». С 1976 по 1979 гг. работал заведующим учебной лабораторией кафедры электрорадиотехники и радиоспектроскопии (с 2016 г. – радиопизики и инфокоммуникационных технологий).

В 1982 г. окончил аспирантуру Ужгородского государственного университета и защитил кандидатскую диссертацию. В 1983 г. возвращается в Донецкий государственный университет и работает в должностях: младший научный сотрудник, старший научный сотрудник, ассистент, доцент.

С 1987 по 1999 гг. совмещает работу в университете с работой в Научно-исследовательском институте комплексной автоматизации в должностях: ведущий инженер, старший научный сотрудник, начальник отдела, ведущий научный сотрудник. Научно-практическая деятельность Данилова В. В. в НИИКА связана с созданием оптоэлектронных приборов специального назначения и оптоволоконных медицинских систем.

В 2004 году защитил докторскую диссертацию по специальности «05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» (технические науки). Диссертация и дальнейшие исследования Данилова В. В. направлены на решение проблемы повышения быстродействия вычислительных средств за счет перехода на оптоэлектронную элементную базу.

С 2004 г. и по настоящее время работает заведующим кафедрой радиофизики (с 2016 г. – радиофизики и инфокоммуникационных технологий) и по совместительству профессором этой же кафедры.

В 2011 г. являлся одним из инициаторов открытия новой специальности «Безопасность информационно-коммуникационных систем» (с 2015 г. – «Информационная безопасность») на Физико-техническом факультете ДонНУ.

В 2015-2016 гг. работал деканом Физико-технического факультета ДонНУ. Также с 2015 г. и по настоящее время руководит важнейшими госбюджетными научно-исследовательскими работами кафедры радиофизики и ИКТ.

В 2017-2018 гг. работал проректором по научной и инновационной деятельности ДонНУ. Также в 2017 г. был одним из инициаторов открытия серии «Технические науки» научного журнала «Вестник Донецкого национального университета», главным редактором которого является в настоящее время. Кроме того, является членом редакционной коллегии научного журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки», а с 2020 г. - заместителем главного редактора научного журнала «Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта».

В 2018 году был одним из инициаторов открытия Диссертационного совета Д 01.024.04, заместителем председателя которого является и по настоящее время. Кроме того, являлся членом Экспертного совета ВАК при МОН ДНР по физико-математическим и химическим наукам (2015-2020 гг.), по техническим наукам (2020-2023 гг.).

Желаем Владимиру Васильевичу прежде всего крепкого здоровья, долгожданного мирного неба, благополучия и новых научных достижений!

Редакционная коллегия журнала и
коллектив кафедры радиофизики и ИКТ

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Редакция журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки» принимает к рассмотрению на предмет опубликования в журнале ранее не опубликованные и не представленные для одновременной публикации в других изданиях научные статьи по тематике журнала.
2. Авторы статей несут персональную ответственность за наличие элементов плагиата в текстах статей, за полноту и достоверность изложенных фактов и положений, за факт их публикации. Допускается публикация не более двух статей от одного автора в одном номере и наличие не более пяти авторов одной статьи. Один из авторов должен иметь ученую степень. Гонорар не выплачивается и плата за публикацию статей не взимается.
3. Авторами представляется рукопись статьи в одном экземпляре (на русском или английском языке), напечатанном с одной стороны листа бумаги формата А4 (экземпляр подписывается авторами). Страницы рукописи должны быть последовательно пронумерованы. Объем рукописи, как правило, от 5 до 15 страниц (для обзорной статьи – до 25), включая рисунки, таблицы, список источников, сведения об авторах. Вместе с рукописью на адрес электронной почты vestnik.donnu.g@donnu.ru высылается электронный вариант с полным текстом статьи в формате doc или docx. При отсутствии возможности предоставления в редколлегию рукописи, на электронную почту редакции высылается полный текст статьи в формате pdf. Статьи, не соответствующие Правилам для авторов или тематике журнала, к рассмотрению не принимаются. Все статьи, принятые к рассмотрению, подвергаются рецензированию и в случае положительной рецензии – научному и техническому редактированию.
4. Решение о публикации, публикации после доработки/переработки или отклонении статьи принимается редакционной коллегией журнала. Если статья рекомендуется к публикации после небольшой авторской доработки, редакция направляет авторам статьи замечания (без указания рецензента). Статья, направленная авторам на доработку, должна быть возвращена в исправленном виде в максимально короткий срок. К доработанной статье необходимо предоставить письмо от авторов, содержащее ответы на все замечания и поясняющие все изменения, сделанные в статье. В случае отклонения статьи редакция направляет авторам рецензию (без указания рецензента) или выдержки из нее, либо аргументированное письмо редактора. Редакция не вступает в дискуссию с авторами отклоненных статей, за исключением случаев явного недоразумения.
5. Обязательные требования к оформлению статей:
 - **Размер бумаги:** А4.
 - **Ориентация:** книжная.
 - **Поля:** зеркальные, верхнее – 30 мм, нижнее – 30 мм, внутри – 30 мм, снаружи – 20 мм.
 - **Положение верхнего и нижнего колонтитула относительно края:** 2 см.
 - **Междустрочный интервал:** одинарный.
 - **Абзацный отступ:** 1 см.
 - **Основной текст статьи:** шрифт Times New Roman, размер 12 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
 - **Аннотация, список источников, сведения об авторах:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
 - **Подписные подписи, заглавие и содержание таблиц:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по центру, без автоматической расстановки переносов.

6. Текст статьи должен соответствовать следующей структурной схеме:

- **Первая строка:** индекс УДК – выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через строку:** **НАЗВАНИЕ** статьи – полужирный, выравнивание по центру, прописными буквами, без переноса слов, без абзацного отступа.
- **Через строку:** копирайт © и год – полужирный, выравнивание по левому краю, без точки после года, через 3 пробела *фамилия(и) и инициалы автора(ов)* – полужирный, курсив, выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через две строки:** аннотация объемом до 100 слов, кратко отражающая предмет статьи, примененные методы исследований и основные результаты, полученные авторами.
- **На следующей строке:** словосочетание *Ключевые слова:* – полужирный, курсив. Далее приводятся ключевые слова количеством до 10 слов, отделяемых друг от друга запятой. Блок аннотация и ключевые слова рекомендуется отделять от основного текста с помощью инструмента «Границы».
- **Через две строки:** основной текст статьи, который содержит введение, основную часть и выводы. Во **введении** рекомендуется излагать постановку проблемы в общем виде и связь с важнейшими научными и практическими задачами, анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья, формулировку целей статьи. В **основной части** рекомендуется излагать основные материалы исследования с полным обоснованием полученных научных результатов. Основную часть рекомендуется структурировать на разделы с названиями, отражающими их содержание (например: постановка задачи; методы ее решения; анализ полученных результатов). В **выводах** рекомендуется кратко и четко подводить итоги основных результатов, полученных авторами и описывать перспективы дальнейших исследований в данном направлении.
- **Через строку:** словосочетание **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ** размером 10 пт., полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее через строку с абзачным выступом 0,5 см приводится нумерованный перечень используемых источников общим списком в порядке упоминания в тексте на языке оригинала в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100–2018 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Ссылка на источник приводится в квадратных скобках. Разрешается ссылаться только на опубликованные работы. Необходимо наличие источников последних 5-10 лет по исследуемому вопросу.
- **Через строку:** надпись «Поступила в редакцию *хх.хх.20хх г.*, рекомендована к печати *хх.хх.20хх г.*» размером 10 пт., курсив, выравнивание по правому краю.
- **Через строку:** приводится **НАЗВАНИЕ** статьи, *фамилия(и) и инициалы автора(ов)*, аннотация и ключевые слова (**Keywords**) на английском языке (перевод) размером 10 пт.
- **Через строку:** сведения об авторах размером 10 пт., в таблице с параметром «Нет границ», содержащей два столбца (для сведений на русском и английском языках):
- **Фамилия, имя, отчество;**
- ученая степень, ученое звание, должность, с указанием организации (в соответствии с уставом), которую представляет автор;
- страна, город;
- адрес электронной почты.

7. Образец оформления статьи:

УДК 65.011.56:681.5.08

ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ПАВ ПОСРЕДСТВОМ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2023 Третьяков И.А., Данилов В.В.

В данной работе продолжено описание элементов специализированных автоматизированных систем научных исследований параметров поверхностных акустических волн, на основе оптического зондирования, в частности, метода стационарной опорной решетки и метода «ножевой диафрагмы».

Ключевые слова: автоматизированная система, поверхностные акустические волны, дифракция.

Введение. Оптические методы измерения параметров ПАВ [1-3] ...

Постановка задачи. По многочисленности обрабатываемой информации [4] ...

Метод оптического зондирования. При зондировании поверхностных ...

Выводы. Таким образом, показаны элементы автоматизированных ...

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Яновский, А. В. Структуры автоматизированных систем научных исследований параметров поверхностных акустических волн / А. В. Яновский, И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 4. – С. 46-53. – EDN FOBKIO.
2. Автоматизированные системы научных исследований. – URL: https://studbooks.net/1386372/avtomatizirovannye_sistemy_upravleniya (дата обращения: 20.02.2023).

Поступила в редакцию xx.xx.2023 г., рекомендована к печати xx.xx.2023 г.

ELEMENTS OF AUTOMATED PSAW MEASUREMENT SYSTEMS BY MEANS OF OPTICAL SENSING METHODS

Tretiakov I.A., Danilov V.V.

In this paper, the description of the elements of specialized automated systems for scientific research of the parameters of surface acoustic waves, based on optical sensing, in particular, the method of stationary support grating and the method of "knife diaphragm", is continued.

Keywords: automated system, surface acoustic waves, diffraction.

Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, заместитель декана по научной работе, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Deputy Dean for Research, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir Vasilevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

8. Рисунки и таблицы располагаются по тексту строго в пределах печатного поля книжной ориентации страниц после их первого упоминания в тексте статьи. Вся текстовая информация на рисунках должна быть четкой и разборчивой и не иметь лишних деталей. Каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись (не совмещенную с рисунком) в формате: «Рис. №. Название». Каждая таблица должна иметь заглавие в формате: «Таблица №. Название». Во избежание смещений рисунков рекомендуется размещать их в таблицах с двумя строками с параметром «Нет границ» (в первой строке размещается рисунок, во второй - подрисуночная подпись). Все рисунки и таблицы должны быть последовательно пронумерованы арабскими цифрами, допускается применение букв при нумерации рисунков, состоящих из нескольких частей. Сканированные рисунки не допускаются. Образец оформления рисунка и таблицы:

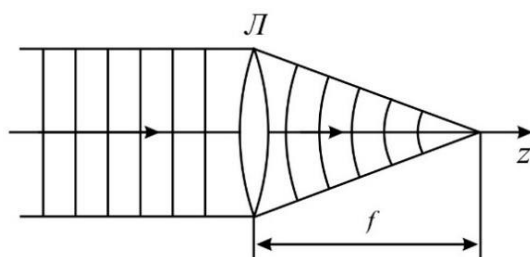


Рис. 1. Действие линзы на плоскую волну

Таблица 1. Номиналы элементов схемы УМ класса F₃

Элемент	Номинал	Единица измерения
C _{out}	25	пФ
C ₁	10	нФ
C ₂	100	мкФ
L ₁	150	мкГн
L ₂	460	нГн
L ₃	765	нГн
R ₁	0,39	МОм

9. Формулы выравниваются по центру и имеют, при необходимости, сквозную нумерацию по правому краю. Для выравнивания формул рекомендуется использовать таблицы с параметром «Нет границ». После формул ставится тот знак препинания, который необходим исходя из построения фразы. Нумеровать следует только те формулы, на которые имеются ссылки в тексте. Ссылки на формулы приводятся в круглых скобках. Каждая формула отделяется от основного текста интервалом в 6 пт. перед и после. Формулы, их компоненты и все переменные в тексте и отдельно в строках набираются только с помощью редакторов формул Microsoft Equation 3.0 или MathType 5.0 и выше с параметрами:

- **текст и переменная:** наклонный;
- **матрица-вектор:** полужирный наклонный;
- **размер:** обычный - 12 пт., крупный индекс - 9 пт., мелкий индекс - 7 пт., крупный символ - 18 пт., мелкий символ - 12 пт.

Образец оформления формулы:

$$y_t = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i y_{t-i} + b \xi_t \quad (1)$$

10. Материалы предоставляются по адресу:

283001, Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13, Физико-технический факультет.

Главный редактор: Данилов Владимир Васильевич, каб. 203.

Зам. главного редактора: Третьяков Игорь Александрович, каб. 210.

Ответственный секретарь: Пометун Екатерина Дмитриевна, каб. 001.

Контактный тел.: +7 (856) 302 07 81

E-mail: vestnik.donnu.g@donnu.ru

Научное издание

**Вестник Донецкого национального университета.
Серия Г: Технические науки**

– 2023. – № 3.

Научное и техническое редактирование: И.А. Третьяков, Е.Д. Пометун

Адрес редакции:

ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
283001, Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13.
Тел.: +7 (856) 302 07 81.

E-mail: vestnik.donnu.g@donnu.ru

URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

Подписано в печать 29.09.2023 г.
Формат 60×84/8. Бумага офсетная.
Печать – цифровая. Усл. печ. л. 7,79.
Тираж 100 экз. Заказ. №
Бесплатно.

Издательство ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
283001, Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24.
Тел.: +7 (856) 302 92 27.

Свидетельство о внесении субъекта издательской деятельности
в Государственный реестр
серия ДК № 1854 от 24.06.2004 г.