ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 3 (550)

2021

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 3(550) **2021** **Издается с 1950 г.**

Главный редактор
д.т.н. **А.А. Борисов**

Редакционная коллегия:

к.т.н. **С.В. Щербаков** (*зам. главного редактора*);
к.т.н. **С.А. Зайцев** (*зам. главного редактора*);
к.ф.-м.н. **А.В. Галдецкий**; д.т.н. **П.В. Куприянов**;
д.т.н. **Н.А. Лябин**; д.ф.-м.н. **С.П. Морев**;
д.ф.-м.н. **А.И. Панас**;
д.ф.-м.н. **А.Б. Пашковский**; д.т.н. **К.Г. Симонов**;
В.П. Стебунов (*ответственный секретарь*);
к.т.н. **С.Б. Александров**, АО «ГЗ «Пульсар», г. Москва;
д.т.н. **Л.И. Бабак**, ТУСУР, г. Томск;
д.т.н. **А.В. Баранов**, АО «НПП «Салют», г. Нижний Новгород;
д.ф.-м.н. **К.С. Журавлев**, ИФП СО РАН, г. Новосибирск;
д.т.н. **В.М. Исаев**, АО «Российская электроника», г. Москва;
к.т.н. **П.П. Куцько**, АО «НИИЭТ», г. Воронеж;
д.т.н. **И.Е. Лысенко**, ИНЭП ИТА ЮФУ, г. Таганрог;
д.т.н. **П.П. Мальцев**, ИСВЧ ПЭ РАН, г. Москва;
д.ф.-м.н. **А.В. Медведь**, ФИРЭ РАН, г. Фрязино;
к.т.н. **В.М. Миннебаев**, АО «НПП «Пульсар», г. Москва;
к.ф.-м.н. **В.И. Роговин**, АО «НПП «Алмаз», г. Саратов;
д.ф.-м.н. **Д.А. Усанов**, «СГУ им. Н.Г. Чернышевского», г. Саратов;
к.т.н. **А.Ю. Ющенко**, АО «НИИПП», г. Томск

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер ПИ № ФС 77-73640 от 7 сентября 2018 г.).

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал «Электронная техника», серия 1 «СВЧ-техника», издаваемый АО «НПП «Исток» им. Шокина» с 1950 года, включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук».

© АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2021 г.

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 3(550) **2021** **Founded in 1950**

Editor-in-chief

D.T.Sc. **A.A. Borisov**

Editorial staff:

C.T.Sc. **S.V. Scherbakov** (deputy editor-in-chief);
C.T.Sc. **S.A. Zaitsev** (deputy editor-in-chief);
C.Ph.M.Sc. **A.V. Galdetsky**; D.T.Sc. **P.V. Kupriyanov**;
D.T.Sc. **N.A. Lyabin**; D.Ph.M.Sc. **S.P. Morev**;
D.Ph.M.Sc. **A.I. Panas**;
D.Ph.M.Sc. **A.B. Pashkovsky**; D.T.Sc. **K.G. Simonov**;
V.P. Stebunov (executive secretary);
C.T.Sc. **S.B. Alexandrov**, JSC «SP «Pulsar», Moscow;
D.T.Sc. **L.I. Babak**, TUSUR, Tomsk;
D.T.Sc. **A.V. Baranov**, JSC «SPE «Salut», Nizhny Novgorod;
D.Ph.M.Sc. **K.S. Zhuravlev**, ISPh SB RAS, Novosibirsk;
D.T.Sc. **V.M. Isaev**, JSC «Russian Electronics», Moscow;
C.T.Sc. **P.P. Kutsko**, JSC «NIIET», Voronezh;
D.T.Sc. **I.E. Lysenko**, INEP ITA SFU, Taganrog;
D.T.Sc. **P.P. Maltsev**, IMWF SE RAS, Moscow;
D.Ph.M.Sc. **A.V. Medved'**, IRE RAS, Fryazino;
C.T.Sc. **V.M. Minnebaev**, JSC «RPC «Pulsar», Moscow;
C.Ph.M.Sc. **V.I. Rogovin**, JSC «RPC Almaz», Saratov;
D.Ph.M.Sc. **D.A. Usanov**, «SSU named after N.G. Chernyshevsky», Saratov;
C.T.Sc. **A.Yu. Yuschenko**, JSC «NIIPP», Tomsk

The journal is registered by the Federal Service for supervision in the field of communications, information technologies and mass media (certificate ПИ № ФС 77-73640 dated September 7, 2018).

By the Resolution of the Presidium of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation the journal «Elektronnaya Tekhnika», series 1 «SVCH-tekhnika» being published in JSC «RPC «Istok» named after Shokin» since 1950, has been included into the «List of reviewed scientific publications in which the principal scientific results nominated for candidate's thesis and doctoral thesis must be published».

© Joint Stock Company «Research and Production Corporation «Istok» named after A.I. Shokin», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Радиоэлектронные устройства

Карасев М.С. – Оперативный контроль электрических параметров приемопередающих модулей *X*-диапазона частот..... 6

Технология и материаловедение

Лукашин В.М. – Особенности формирования омических контактов в DA-DpHEMT..... 15

Твердотельная электроника

Билевич Д.В. – Обзор цифровых драйверов управления СВЧ многофункциональных интегральных схем на основе GaAs-технологии..... 26

Медицинская электроника

Казаринов К.Д. – Особенности реакции клеток крови на микроволновое излучение..... 42

Краткие сообщения

Попов И.П. – Об излучательной способности зарядов..... 49

Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А. – Свойства периодических дробей. Часть 2..... 54

Экономика

Вершинин А.А., Киричек М.О. – Современное состояние и экспортная активность предприятий отечественного машиностроения..... 60

Шутов Д.Г. – Внутрихолдинговый баланс «затраты – выпуск» для предприятий радиоэлектронного комплекса..... 66

История

Балыко А.К., Балыко Т.А. – Наши доктора наук..... 71

.

CONTENTS

Radioelectronic devices

Karasev M.S. – Online monitoring of electrical parameters of *X*-frequency band transceiving modules..... 6

Technology and material science

Lukashin V.M. – The features of forming ohmic contacts in DA-DpHEMT..... 15

Solid-state electronics

Bilevich D.V. – A review of the digital control logic for GaAs core-chip..... 26

Medical electronics

Kazarinov K.D. – Features of the blood cell's reaction to microwave radiation..... 42

News in brief

Popov I.P. – About the emissivity of charges..... 49

Balyko A.K., Tereshkin E.V., Balyko I.A. – Properties of recurrent fractions. Part 2..... 54

Economics

Vershinin A.A., Kirichek M.O. – Current state and export activity of domestic mechanical engineering enterprises..... 60

Shutov D.G. – The interholding balance «costs – output» for enterprises of radioelectronic complex..... 66

History

Balyko A.K., Balyko T.A. – Our doctors of science..... 71

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.396.61/62

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ *X*-ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

М. С. Карасев

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Статья посвящена исследованию возможности реализации оперативного контроля электрических параметров приемопередающих модулей. Потребностью для исследования послужили требования, выдвигаемые для РЛС нового поколения. В ходе исследования были разработаны схемы, позволяющие при помощи специальных методов и алгоритмов обработки контрольных сигналов исправности получить данные об электрических параметрах каналов приемопередающих модулей.

КС: оперативный контроль, приемопередающий модуль, система контроля мощности, положительная обратная связь, контроль коэффициента усиления, корректировка параметров импульсов управления

ONLINE MONITORING OF ELECTRICAL PARAMETERS OF *X*-FREQUENCY BAND TRANSCEIVING MODULES

M. S. Karasev

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

The paper is devoted to investigating a possibility of realizing online monitoring of electrical parameters of the transceiving modules. The requirements for the investigation were the requirements put forward for a new generation of radars. In the course of the study, schemes were developed that allow, using special methods and algorithms for processing control signals of serviceability, to obtain data on electrical parameters of the transceiving modules channels.

Keywords: online monitoring, transceiving module, power control system, positive feedback, gain control, correction of control pulses parameters

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активные фазированные антенные решетки (АФАР) являются основой построения бортовых радиолокационных комплексов. Такие системы позволяют решать широкий спектр задач сканирования пространства в реальном масштабе времени [1].

Основными элементами АФАР являются приемопередающие модули (ППМ). При всех достоинствах ППМ в их составе используется множество элементов, которые могут выйти из строя вследствие влияния внешних помех или различных воздействующих факторов в процессе эксплуатации. Для исключения влияния отказавших или неисправных каналов ППМ на форму диаграммы направленности (ДН) приемопередающей антенны необходимо исследовать возмож-

ность реализации контроля электрических параметров (ЭП) СВЧ-трактов ППМ. Выявленные схемотехнические решения, минимально усложняющие общую схему, позволят отключать неисправные каналы до формирования ДН и производить калибровку (выравнивание) коэффициентов усиления каналов на основе результатов проверки ЭП.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В литературных источниках [2–4] представлены современные ППМ с реализацией узлов проверки работоспособности. По контрольным сигналам с таких узлов появляется возможность определить заданный пороговый уровень мощности на выходе передающего канала. Провести калибровку или подстройку электрических параметров под изменяющиеся условия эксплуатации в режиме реального времени в рассмотренных ППМ нельзя.

Используя известный метод контроля выходной мощности из изученных литературных источников, необходимо разработать структурные схемы, позволяющие с высокой точностью и быстродействием определять основные электрические параметры ППМ. Это позволит проводить дальнейшую калибровку и подстройку электрических параметров каналов в режиме реального времени.

В литературном источнике [5] представлена методика измерения времени восстановления коэффициента передачи приемного канала после воздействия на его вход импульса высокой мощности. Методика позволяет проводить измерения последствий воздействия высокой мощности на вход приемного канала. Рассмотренная в статье проблема и пути ее устранения в настоящее время не решены.

Необходимо исследовать возможность применения метода детектирования выходной мощности в составе приемного канала для защиты элементов СВЧ-тракта от выхода из строя.

По результатам исследований в рамках поставленных задач, требуется разработать общую структурную схему, включающую в себя найденные решения по обеспечению контроля ЭП каналов ППМ.

3. РЕАЛИЗАЦИЯ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

3.1. Система контроля мощности

В качестве базовой схемы для получения контрольных сигналов исправности канала используется система контроля мощности (СКМ) (рис. 1). Схема состоит из направленного ответвителя (НО), детекторного диода (ДД), усилителя постоянного тока (УПТ) и компаратора (КОМ).

Для контроля порогового значения выходной мощности канала необходимо: ответвить часть СВЧ-мощности с основной линии передачи, усилить выходное напряжение с ДД применяемым УПТ, обеспечить вывод уровня напряжения с КОМ отдельным выводом из модуля. При выполнении всех перечисленных условий на контрольном выходе будет возникать логическая «1», сигнализирующая о присутствии требуемого порогового значения мощности в передающем канале.

Типовая амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) узла СКМ с пороговым значением выходной мощности, равным 3 Вт, приведена на рис. 2.

СКМ была реализована в составе ППМ, представленного на рис. 3. Порог исправности рассчитан на значение 5 Вт. АЧХ при срабатывании СКМ представлена на рис. 4.

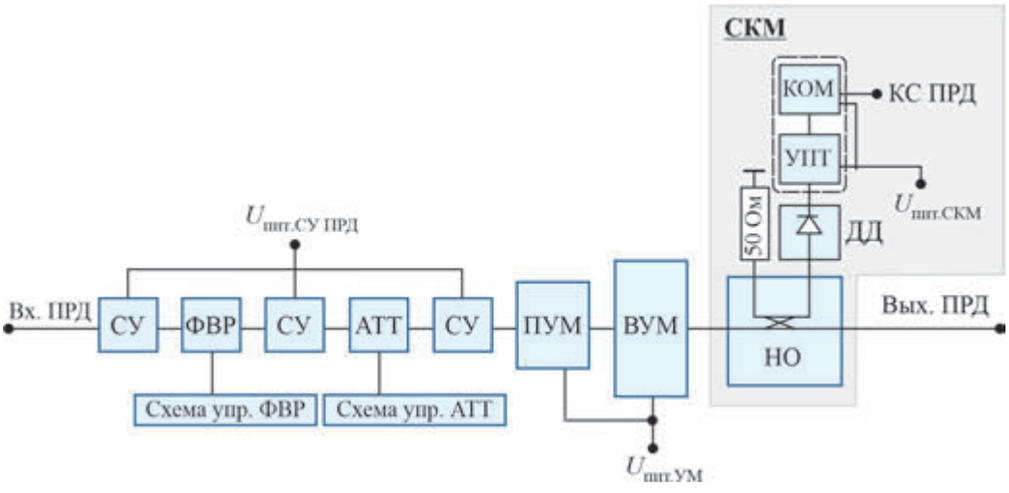

Рис. 1. Структурная схема системы контроля мощности

Рис. 2. Выходная мощность при срабатывании СКМ

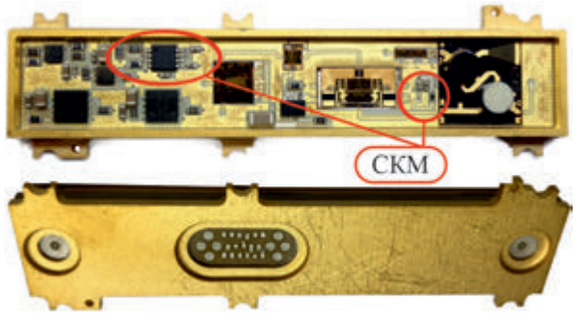

Рис. 3. ППМ с СКМ

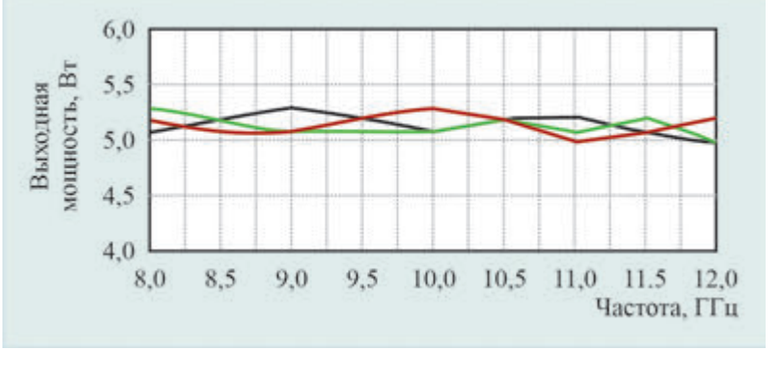

Рис. 4. АЧХ выходной мощности ППМ при срабатывании СКМ

Экспериментально измеренная задержка реагирования СКМ в данном типе ППМ составляет менее 250 нс.

3.2. Контроль коэффициента усиления положительной обратной связью

Разработанная схема контроля коэффициента усиления приемного/передающего канала представлена на рис. 5 [6–9]. На вход ПРМ/ПРД при замыкании СВЧ-выключателя ПРМ/ПРД через направленный ответвитель ПРМ/ПРД проникает часть СВЧ-мощности, ответвляемой с выходного усилителя мощности (ВУМ) для ПРД и с СВЧ-переключателя для ПРМ, через направленный ответвитель с СКМ ПРМ/ПРД. Возникает самовозбуждение приемного/передающего канала из-за положительной обратной связи (ПОС). Направление СВЧ-сигнала при самовозбуждении приемного тракта (зеленая линия) и передающего тракта (красная линия) также изображено на рис. 5.

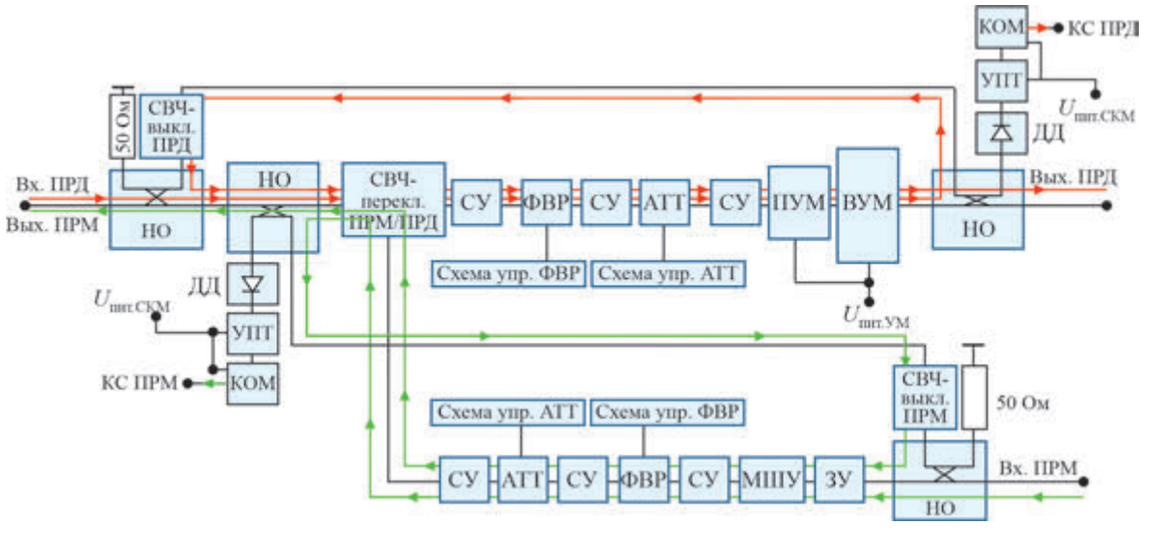

Рис. 5. Схема контроля коэффициента усиления при помощи положительной обратной связи

Ввод разрядов ослабления аттенюаторов (АТТ), расположенных в тракте, позволяет убрать самовозбуждение. Расчет по формуле (1) позволяет вычислить коэффициент усиления тракта и соответственно подтвердить работоспособность, а также провести калибровку каналов.

$$K_{\text{у ПРМ/ПРД}} = |K_{\text{ПОС}}| + \sum R_{\text{АТТ ПРМ/ПРД}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{ПОС}}$ – коэффициент передачи ПОС; $\sum R_{\text{АТТ ПРМ/ПРД}}$ – суммарное ослабление разрядов аттенюаторов приемного/передающего тракта; $K_{\text{у ПРМ/ПРД}}$ – коэффициент усиления приемного/передающего тракта.

Контроль самовозбуждения канала обеспечивается СКМ, на выходе которой возникает КС (логическая «1») при самовозбуждении тракта.

При замыкании СВЧ-выключателя самовозбуждение тракта может не возникнуть, так как фазовые характеристики не соответствуют условию $\Delta\varphi = 0$. Для возникновения самовозбуждения требуется вводить разряды фазовращателей канала до его появления. При отсутствии возбуждения во всех состояниях фазовращателей и аттенюаторов, канал является неисправным.

Экспериментальная проверка работы контроля коэффициента усиления с помощью ПОС представлена в статье [8].

Пример алгоритма вычисления коэффициента усиления приемного канала модуля в диапазоне значений 25…29 дБ приведен на рис. 6.

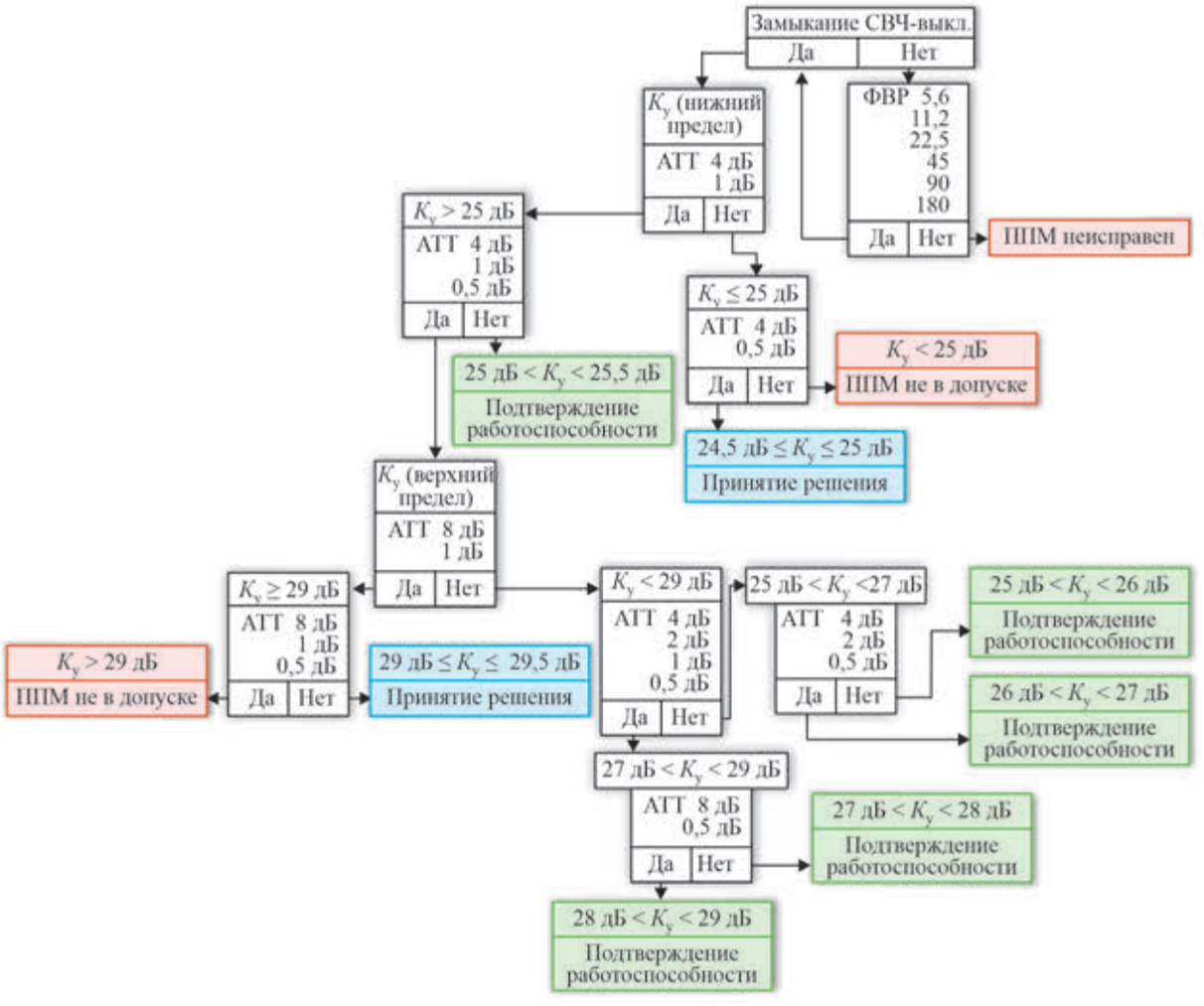

Рис. 6. Алгоритм вычисления коэффициента усиления приемного канала модуля в диапазоне значений 25…29 дБ

Ошибка определения коэффициента усиления канала составляет величину младшего разряда используемого аттенюатора в СВЧ-тракте.

3.3. Контроль коэффициента усиления с помощью внешнего сигнала, подаваемого на вход передающего канала

Разработанная структурная схема контроля коэффициента усиления с помощь внешнего сигнала, подаваемого на вход передающего канала, показана на рис. 7 [6–9].

При использовании данного метода контроля питание передающего канала должно быть отключено. Входная мощность подается на вход ПРД. За счет применения НО ПРД часть мощности через СВЧ-выключатель ПРМ ответвляется на вход ПРМ через НО ПРМ. Так как ПРМ2

работает в штатном режиме, то на выходе ПРМ2 имеется усиленный сигнал, по которому можно вычислить значение коэффициента усиления приемного канала № 2.

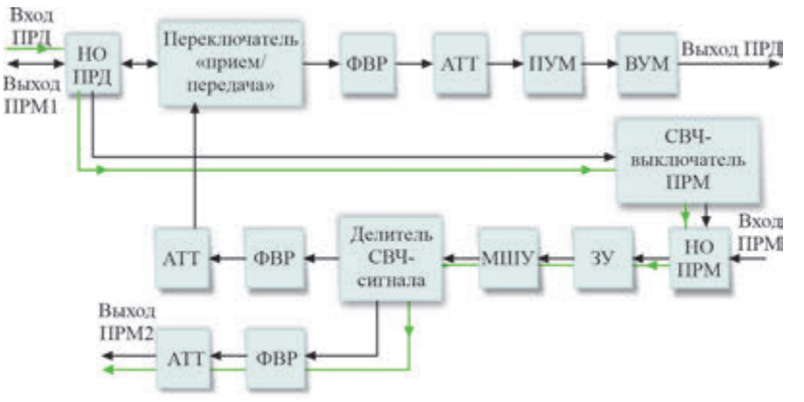

Рис. 7. Схема контроля коэффициента усиления с помощь внешнего сигнала, подаваемого на вход передающего канала

Рассматриваемая схема контроля коэффициента усиления была реализована в составе ППМ, изображенного на рис. 8. Полученные результаты сравнения коэффициента усиления, измеренного стандартными методами, и коэффициента усиления, полученного с использованием схемы контроля, изображены на рис. 9.

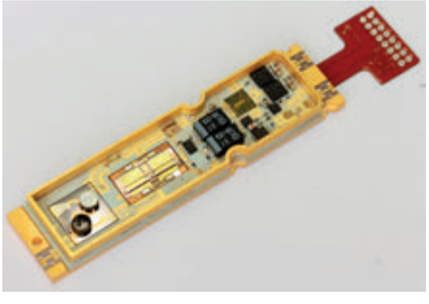

Рис. 8. Экспериментальный образец ППМ со схемой контроля коэффициента усиления с помощью внешнего сигнала, подаваемого на вход передающего канала

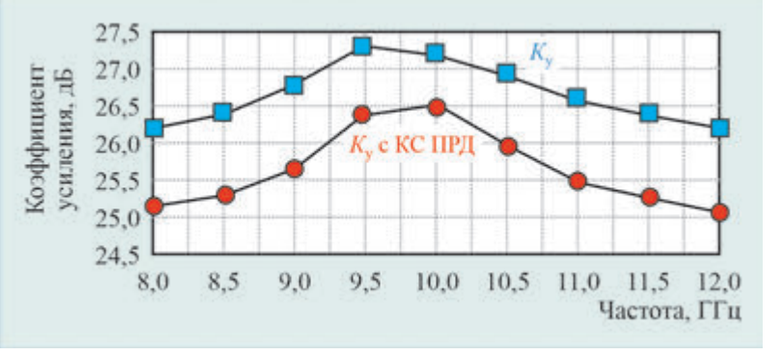

Рис. 9. Полученные результаты сравнения характеристик коэффициентов усиления приемного канала № 2

Как видно из графика, характер линий коэффициентов усиления имеет схожую форму. Различие АЧХ составляет (1 ± 0,2 ± погрешность измерений (ПИ)) дБ. Так как диаграмму направ-

ленности калибруют по вводу калибровочных коэффициентов, то есть по дельта-значению, соответственно схема обеспечивает получение АЧХ коэффициента усиления канала, лежащей в пределах (± 0,2 ± ПИ) дБ от значения, принятого за номинал.

3.4. Схема определения сигнала-помехи

Штатный режим работы ППМ может быть нарушен внешними сигналами-помехами, затрудняющими сканирование окружающего пространства. При этом приемные каналы вводятся в режим глубокого насыщения и считывание информации об объекте в пространстве затрудняется. Для решения задачи восстановления ППМ в штатный режим работы, требуется отключение питания активных элементов приемного тракта, определение параметров приходящего сигнала-помехи высокой мощности и корректировка длительности/скважности импульсных сигналов управления ППМ.

Описанные требования достигаются с помощью схемы, показанной на рис. 10.

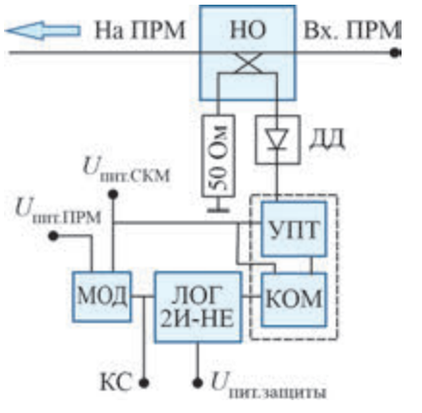

Рис. 10. Схема определения импульса сигнала-помехи цели

Схема включает в свой состав СКМ (п.3.1), логический элемент «2И-НЕ» и модулятор питания (МОД).

При возникновении высокого уровня мощности на входе приемного канала, на выходе КОМ возникает логическая «1» (в соответствии с описанным выше принципом работы СКМ, п.3.1). Логическая «1» подается на вход микросхемы «2И-НЕ». МОД отключает питание активных элементов приемного канала. Усилители без напряжения питания вносят потери в приемный тракт, что позволяет защитить приемник обработки сигналов после ППМ от выхода из строя.

При появлении сигнала-помехи на выходе «КС» в схеме (см. рис. 10), ППМ переводится в адаптивный импульсный режим работы. По форме приходящего импульса сигнала-помехи на устройство обработки сигналов вычисляются его скважность и длительность. После этого корректируются параметры импульсов управления ППМ. Таким образом, при наличии сигнала-помехи на входе приемных каналов активные элементы ПРМ отключены, а после окончания воздействия сигнала-помехи подается сигнал с передающего канала. В оставшийся интервал времени до начала воздействия сигнала-помехи включается работа приемных каналов. Если у облучаемого объекта нет подобного адаптивного режима работы, то объект, излучающий сигнал-помеху, будет «слеп».

Пример расстановки сигналов после проведения корректировки параметров импульсов управления ППМ показан на рис. 11.

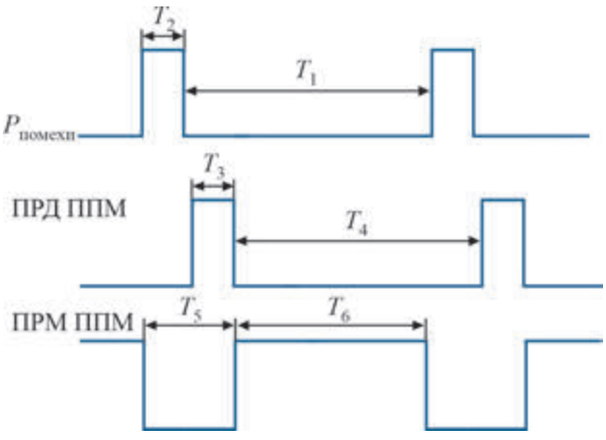

Рис. 11. Временная диаграмма работы ППМ
после корректировки параметров импульсов управления

Для расчета параметров сигнала-помехи требуется знать время восстановления коэффициента передачи приемного канала после воздействия высокого уровня мощности на вход приемника. Подробное описание параметра и методы его измерения представлены в статье [5].

3.5. Общая схема приемопередающего модуля с узлами оперативного контроля

Схема ППМ с разработанными узлами оперативного контроля представлена на рис. 12.

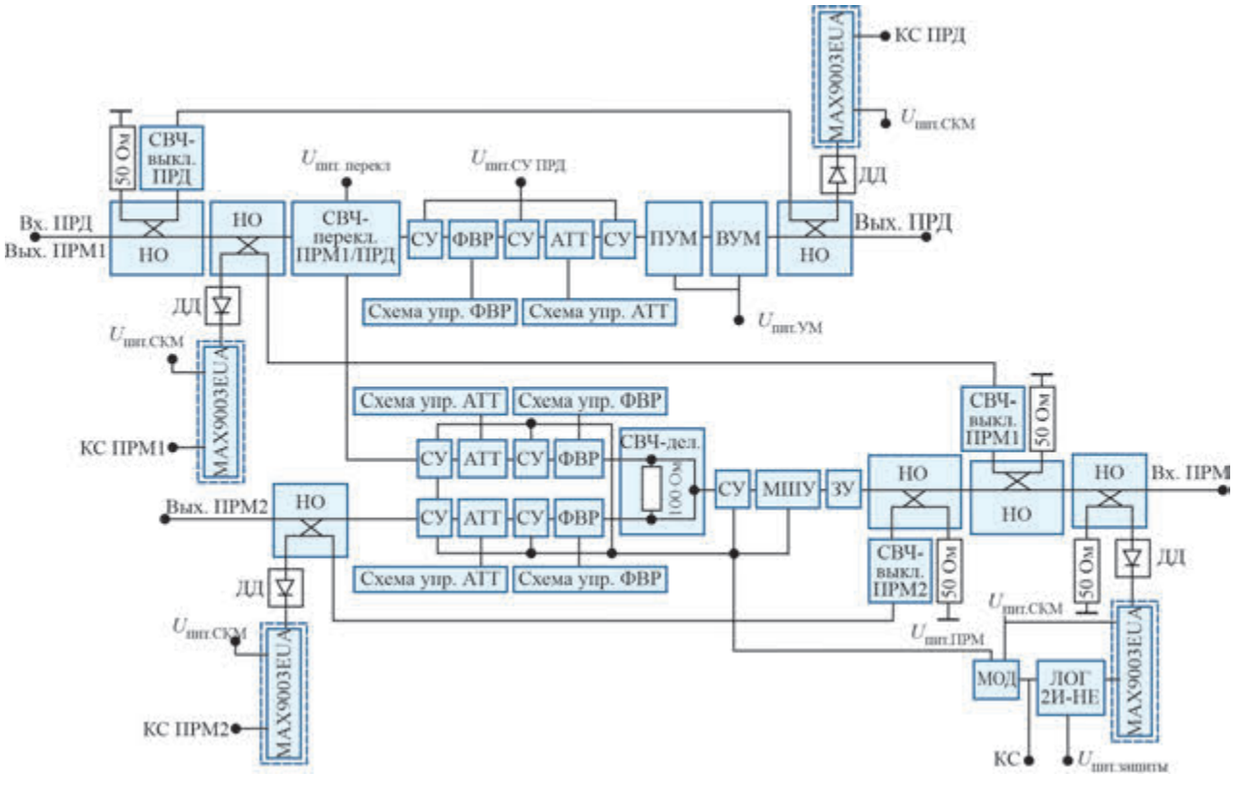

Рис. 12. Схема ППМ с узлами оперативного контроля

Разработанная схема обеспечивает устройство управления и обработки данных блока подрешетки контрольными сигналами, с помощью которых можно проводить калибровку и подстройку ЭП в режиме реального времени.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенной работы выявлены схемотехнические решения по реализации оперативного контроля электрических параметров в составе приемопередающих модулей. Разработанные методы использования контрольных сигналов исправности позволяют выявлять отказавшие или неисправные единицы приемопередающих модулей и отключать их до формирования ДН. Также появилась возможность калибровки или подстройки коэффициентов усиления каналов блоков подрешеток в режиме реального времени.

Дальнейшие исследования найденных методов и алгоритмов контроля электрических параметров каналов приемопередающих модулей должны быть направлены на применение их в составе АФАР.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гостюхин, В. Л.** Активные фазированные антенные решетки / В. Л. Гостюхин, В. Н. Трусов, А. В. Гостюхин // Радиотехника. – 2011. – 304 с.

2. **Берне, Л.** Евроистребитель – «Еврофайтер» EF 2000 / Л. Берне, В. Ильин // Крылья Родины. – 1995. – No 3. – С. 25 – 28.

3. **Карасев, М. С.** Конструктивные особенности ППМ «Аббат-И» с применением поверхностного контактного соединителя для передачи СВЧ-энергии и НЧ-сигналов управления и электропитания / М. С. Карасев, В. А. Жерновенков // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 3(530). – С. 71 – 80.

4. **Карасев, М. С.** Методика измерений параметров перспективных ППМ АФАР с применением поверхностного контактного соединителя / М. С. Карасев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 4(531). – С. 37 – 44.

5. **Карасев, М. С.** Методика измерения времени восстановления коэффициента передачи приемного канала модуля АФАР после воздействия на вход СВЧ-импульса высокой мощности / М. С. Карасев, В. А. Жерновенков, А. Г. Далингер, С. А. Щеголев, А. В. Адиатулин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2018. – Вып. 4(539). – С. 15 – 18.

6. **Karasev, Maksim.** *X*-band transceiver module with a function of internal verification of receiving and transmitting channels / Maksim Karasev, Alexander Dalinger, Sergei Shatsky, Sergei Shchyogolev, Andrey Adiatulin, Dmitriy Zavyalov and Sergei Barskov // ITM Web of conference 30. 01009 – 2019.

7. **Карасев, М. С.** Приемопередающий модуль АФАР *X*-диапазона с внутренней калибровкой приемника и функцией проверки приемного и передающего каналов / М. С. Карасев, А. Г. Далингер, С. В. Шацкий, С. А. Щеголев, А. В. Адиатулин // Материалы конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург. – 2019. – С. 156 – 158.

8. **Карасев, М. С.** Приемопередающий модуль *X*-диапазона с внутренней проверкой электрических параметров приемного и передающего каналов / М. С. Карасев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 2(545).

9. **Патент на изобретение № 2730042 РФ.** Приемопередающий модуль активной фазированной антенной решетки СВЧ-диапазона / А. Г. Далингер, С. В. Шацкий, В. А. Иовдальский, М. С. Карасев.

Статья поступила 21 июня 2021 г.

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.382.3.029.64

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ В DA-DpHEMT

В. М. Лукашин

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Описаны основные особенности формирования омических контактов в DA-DpHEMT. Отмечено, что большая концентрация акцепторов в верхнем *p–i–n*-барьере не позволяет сформировать омические контакты истока и стока с малым переходным сопротивлением в классическом исполнении. Показано, что хорошие омические контакты истока и стока могут быть получены методом формирования непосредственно к слою InGaAs-канала, выходящего на поверхности плоских боковых стенок мезы, в которой размещается транзистор. Полученные результаты могут быть использованы при изготовлении DA-pHEMT с улучшенными характеристиками.

КС: омический контакт к слою канала, переходное сопротивление контакта, плазмохимическое травление гетероструктур, ионно-лучевое травление гетероструктур

THE FEATURES OF FORMING OHMIC CONTACTS IN DA-DpHEMT

V. M. Lukashin

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

The distinctive features of forming ohmic contacts in DA-DpHEMT are described. It is noted that the high concentration of acceptors in the upper *p–i–n* barrier does not allow the formation of ohmic contacts of the source and drain with a low transient resistance in the classical design. It is shown that good ohmic source and drain contacts can be obtained by forming a channel directly to InGaAs-layer that emerges on the surface of the flat side walls of the mesa, in which the transistor is located. The results obtained can be used in manufacturing DA-pHEMT with improved characteristics.

Keywords: ohmic contact to the channel layer, contact transient resistance, plasma-chemical etching of heterostructures, ion-beam etching of heterostructures

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие наблюдается усиление активности в разработке и производстве мощных полевых транзисторов на основе нитрида галлия [1–5] и их интеграции в различные типы усилителей мощности. Стремительное улучшение характеристик таких приборов обосновывает уверенность в том, что традиционные мощные СВЧ-транзисторы типа pHEMT (pseudomorphic high electron mobility transistor) на основе псевдоморфных AlGaAs–InGaAs–GaAs-

гетероструктур в ближайшее время будут практически полностью вытеснены из сантиметрового и длинноволновой части миллиметрового диапазонов длин волн. При этом исключение могут составить транзисторы для СВЧ-аппаратуры, требующей низковольтного (не более 8…9 В) напряжения питания.

Несмотря на изобилие апробированных вариантов конструкций и многолетнее промышленное производство, pHEMT на основе AlGaAs–InGaAs–GaAs на частоте 10 ГГц не показывали удельную выходную СВЧ-мощности более 1,2 Вт/мм без существенного снижения коэффициента усиления.

По всей видимости, это ограничение по выходной мощности является результатом влияния сильного разогрева электронов, в результате которого они покидают квантовую яму слоя канала и теряют подвижность в слоях, выращенных ниже и выше канала. Для ограничения переноса горячих электронов в слои, обрамляющие канал транзистора, было решено сформировать в гетероструктуре дополнительные потенциальные барьеры на основе встроенных *p–i–n*-структур, усиливающие локализацию горячих электронов в слое канала. Такой вариант полевого транзистора был успешно апробирован и из-за использования селективного донорно-акцепторного легирования (DA) получил название «DA-DpHEMT». В частности, по сравнению с контрольными конструкциями DpHEMT с селективным донорным легированием, в DA-DpHEMT в *X*-диапазоне получено увеличение выходной СВЧ-мощности в 1,5…2,0 раза [6]. Отметим, что, при использовании в составе транзистора даже «медленных» структур вида «AlGaAs–InGaAs-канал–GaAs-подложка», на оптимизированной под повышенное быстродействие конструкции DA-DpHEMT получен прорывной результат – показана возможность стабильной работы в усилительном режиме в миллиметровом диапазоне на частотах до 100 ГГц [7].

Разработка DA-DpHEMT на основе AlGaAs–InGaAs–GaAs не является окончательной самоцелью, она может рассматриваться как отдельное решение, позволяющее на практике не только производить транзисторы, но и увидеть, и спрогнозировать величину полезного эффекта от введения локализующих барьеров. Очевидно, что это решение можно использовать для улучшения транзисторов, принадлежащих к различным типам гетероструктур. В частности, локализующие *p–i–n*-барьеры, усиливающие локализацию горячих электронов в слое канала, также могут быть использованы в транзисторах на основе таких «быстрых» гетероструктур, как AlInAs–InGaAs–GaAs, AlInAs–InGaAs–InP, традиционно применяемых в транзисторах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, и в широко применяемых полевых транзисторах различных типов с GaN-каналом.

Однако в любом случае разработка хорошего полевого транзистора требует не только использования гетероструктур с необходимым набором слоев, но и оптимизации основных элементов конструкции транзистора и их технологии, в частности оптимизации конструкции и технологии омических контактов истока и стока. Метод формирования омических контактов в DA-DpHEMT напрямую связан со специфичным легированием и составом слоев в DA-DpHEMT-структурах, в частности с наличием акцепторного слоя, входящего в верхний локализующий *p–i–n* потенциальный барьер.

2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ DA-DpHEMT-ГЕТЕРОСТРУКТУР

Основные слои DA-DpHEMT-гетероструктур представлены в табл. 1 [7].

Таблица 1

Основные слои DA-DpHEMT-гетероструктуры

№	Слой, его назначение	Уровень легирования	Толщина, нм
1	GaAs – буферный	–	400
2	$Al_{0,25}Ga_{0,75}As$ – буферный	–	100
3	$Al_{0,25}Ga_{0,75}As$:Be – нижний акцепторный	$2,55\cdot10^{18}$ см$^{-3}$	15
4	$Al_{0,25}Ga_{0,75}As$ – *i*-слой	–	3,6
5	GaAs – нижняя стенка нижней матрицы	–	0,9
6	Нижний δ:Si-слой	$6,0\cdot10^{12}$ см$^{-2}$	–
7	GaAs – верхняя стенка нижней матрицы	–	1,5
8	$(AlAs)_3/(GaAs)_5$ – нижний спейсер	–	3,1
9	GaAs – нижний сглаживающий слой	–	0,9
10	$In_{0,22}Ga_{0,78}As$-канал	–	10
11	GaAs – верхний сглаживающий слой	–	0,9
12	$(AlAs)_2/(GaAs)_3$ – верхний спейсер	–	2,3
13	GaAs – нижняя стенка верхней матрицы	–	0,9
14	Верхний δ:Si-слой	$9,5\cdot10^{12}$ см$^{-2}$	–
15	GaAs – верхняя стенка верхней матрицы	–	1,5
16	$Al_{0,33}Ga_{0,67}As$ – *i*-слой	–	2,3
17	$Al_{0,25}Ga_{0,75}As$ – *i*-слой	–	3,0
18	$Al_{0,33}Ga_{0.67}As$ – *i*-слой	–	2,3
19	Al0,25Ga0,75As:Be – верхний акцепторный слой	$4,83\cdot10^{18}$ см$^{-3}$	8,0
20	$Al_{0,25}Ga_{0,75}As$ – подзатворный слой	–	20,0
21	GaAs – контактный слой	–	27
22	n^+-GaAs:Si – контактный слой	$4,0\cdot10^{18}$ см$^{-3}$	52

В отличие от классических pHEMT-структур, DA-DpHEMT-гетероструктура с параметрами, приведенными в табл. 1, имеет ряд характерных особенностей.

В частности, слои № 3…7 образуют нижнюю *p–i–n*-структуру, слои № 13…19 образуют верхнюю *p–i–n*-структуру, которые формируют соответственно нижний и верхний потенциальные барьеры, усиливающие локализацию горячих электронов в слое $In_{0,22}Ga_{0,78}As$-канала.

При этом нижний и верхний δ – Si-слои выполняют двойную функцию – поставляют электроны в слой канала и участвуют в формировании локализующих потенциальных барьеров на основе *p–i–n*-структур.

Известно [8], что в процессе роста pHEMT-структур методом молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием технологии δ – Si-легирования наблюдается заметная миграция легирующей примеси в направлении роста структуры. Этот эффект может из-за миграции нижних доноров в слой канала и верхних доноров в *i*-слой верхней *p–i–n*-структуры существенно уменьшить подвижность электронов, а также высоту верхнего локализующего барьера и увеличить длину нарастания его стенки. Для подавления этих нежелательных эффектов при сохранении малой ширины квантовой структуры ямы (дающей усиление размерного квантования) было принято решение минимизировать толщины спейсеров, при этом спейсеры сформировать из наборов «цифровых» слоев $(AlAs)_3/(GaAs)_5$ (нижний спейсер) и $(AlAs)_2/(GaAs)_3$ (верхний спейсер), гетероинтерфейсы которых хорошо подавляют миграцию примеси. В нижнем спейсере толщины слоев AlAs и GaAs составляли соответственно 3 и 5 монослоев, в верхнем – соответственно 2 и 3 монослоя. «Цифровой» состав был также использован в слоях № 16 и 18.

В результате введения локализующих потенциальных барьеров, использования спейсеров с цифровым составом и цифрового состава слоев № 16 и 18 были изготовлены DA-DpHEMT-гетероструктуры, отличающиеся высокой концентрацией и подвижностью электронов в слое канала (табл. 2), полученные из измерений Холл-эффекта на образцах с относительно большими характерными размерами (несколько миллиметров). Измерения спектра подвижностей не выявили присутствия в структуре медленной компоненты электронного газа с подвижностью менее 5780 см^2/(В·с) при 300 К.

Таблица 2

Результаты измерения холловской подвижности и концентрации электронов в DA-DpHEMT-гетероструктуре с параметрами, приведенными в табл. 1

Концентрация электронов n_s (300 K)	$4{,}73\cdot10^{12}$ см$^{-2}$
Подвижность электронов μ (300 K)	5780 см^2/(В·с)
Концентрация электронов n_s (77 K)	$4{,}81\cdot10^{12}$ см$^{-2}$
Подвижность электронов μ (77 K)	13540 см^2/(В·с)

3. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ DA-DpHEMT

Присутствие в DA-DpHEMT-структуре слоя № 19, имеющего высокий уровень легирования акцепторами и необходимого для формирования верхнего локализующего барьера, не позволяет без дополнительных операций сформировать хорошие омические контакты истока и стока в классическом исполнении – когда плоскость контакта параллельна поверхности пластины. Действительно, для омического контакта в классическом исполнении необходимо в области контакта удалить слои № 20…22 и верхний акцепторный слой № 19. При этом воспроизводимое удаление этих слоев может быть получено в том случае, если в табл. 1 слой № 20 заменить на

GaAs – подзатворный слой, а слой № 19 заменить на GaAs:Be – верхний акцепторный слой (при этом потребуется корректировка толщины слоя № 17 в сторону увеличения).

Необходимость сохранения заданной толщины нового подзатворного слоя требует введения между слоями № 20 и 21 дополнительного стоп-слоя, например, из нелегируемого $Al_{0,25}Ga_{0,75}As$ толщиной 3 нм. Воспроизводимое (по толщине удаляемого материала) травление слоев № 19…22 в области омических контактов может быть проведено методом реактивного травления в плазме BCl_3 с добавкой SF_6 после окончания травления дополнительного стоп-слоя. Наличие фтора за счет образования стоп-слоя из AlF_3 приводит к остановке процесса травления на следующем Al-содержащем слое № 18 – на слое $Al_{0,33}Ga_{0,67}As$ [9].

Необходимость формирования омических контактов истока и стока в классическом исполнении далеко не очевидна. Действительно, современные мощные СВЧ-транзисторы монолитно интегрированы с входными и выходными СВЧ-линиями, схемами согласования и линиями питания. При этом все это схемотехническое окружение располагается вне площадки, занимаемой непосредственно транзистором: либо на поверхности подложки, либо на поверхности GaAs буферного слоя. Таким образом, сам транзистор, например, в составе усилителя мощности локализован в собственной мезаструктуре, имеющей боковые стенки, на поверхность которых выходит слой $In_{0,22}$ $Ga_{0,78}As$-канала. Это открывает возможность формирования омических контактов истока и стока к слою канала на боковых стенках без удаления верхнего акцепторного слоя и без изменения параметров структуры (рис. 1).

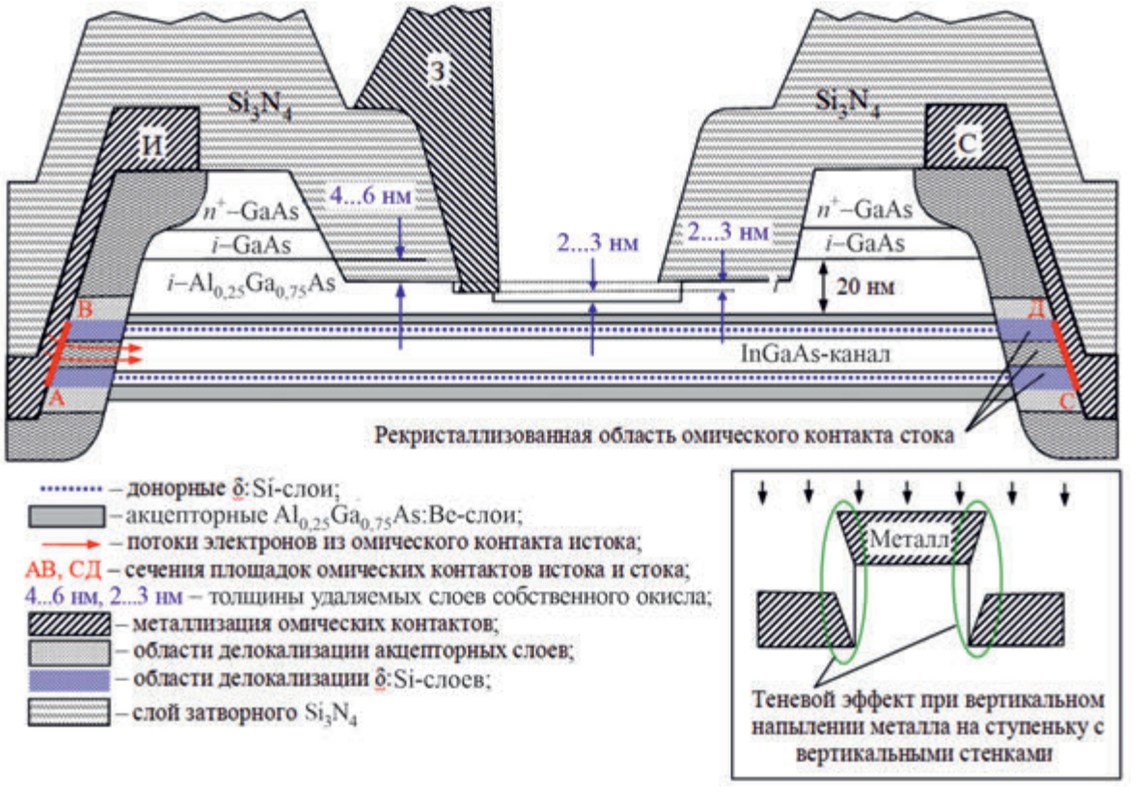

Рис. 1. Схематичный вид сечения DA-DpHEMT с Г-затвором, сформированным методом наклонного напыления. Защитный слой Si_3N_4 не показан

На рис. 1 показано, что омические контакты истока и стока непосредственно к слою $In_{0,22}Ga_{0,78}As$-канала сформированы на плоских боковых стенках мезы, в которой расположен транзистор. При этом для получения хороших омических контактов необходимо обеспечить наклон боковых стенок по отношению к нормали к поверхности гетероструктуры. В противном случае, если, например, меза будет иметь вертикальные боковые стенки, при напылении металлизации образуется теневой эффект, препятствующий напылению на них металла. Теневой эффект показан на вставке в правом нижнем углу рис. 1. На первый взгляд, формирование наклонных и плоских боковых стенок у транзисторной мезы не должно вызывать проблем – достаточно использовать анизотропный перекисно-аммиачный травитель (например, H_2O_2:NH_4OH) и получить желаемый результат (рис. 2).

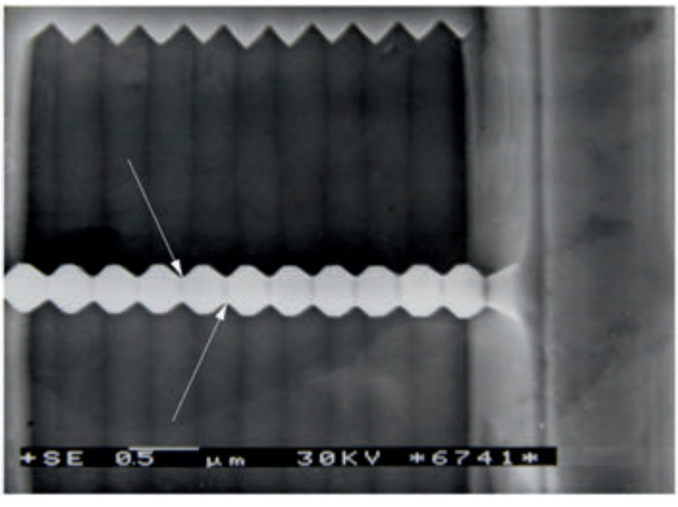

Рис. 2. Пример формирования *V*-образных канавок в *i*–GaAs-структуре при использовании перекисно-аммиачного травителя. Стрелками показаны расположения дна *V*-канавок, хорошо виден наклон их плоских боковых стенок

Переменный состав слоев гетероструктуры (см. табл. 1) и высокий уровень легирования донорами слоя № 22 усложнили задачу получения плоских наклонных боковых стенок транзисторной мезы в перекисно-аммиачном травителе, классическое анизотропное травление не наблюдалось – слой канала травился с более высокой скоростью, формируя впадину на боковой стенке, препятствующую при вертикальном напылении нанесению металлизации омического контакта непосредственно на слой канала. По этой причине был использован перекисно-сернокислотный травитель (H_2O_2:H_2SO_4). Однако в этом травителе максимальная скорость травления была получена не в вертикальном, а в горизонтальном направлении, что привело к очень сильному наклону боковых стенок мезы (рис. 3). Причина этого эффекта заключалась в том, что на границе раздела слой № 22 – фоторезист наблюдалось отделение фоторезиста от поверхности полупроводника. Это стимулировало ускоренное травление в горизонтальном направлении в щели под отделенным слоем фоторезиста, и, как следствие, был получен сильный наклон боковых стенок (среднее отклонение боковых стенок от нормали к поверхности пластины составило 85 град для рис. 3, *а* и 80 град для рис. 3, *б*), однако при этом эффект вытравливания впадины в слое канала на боковых стенках мезы был устранен.

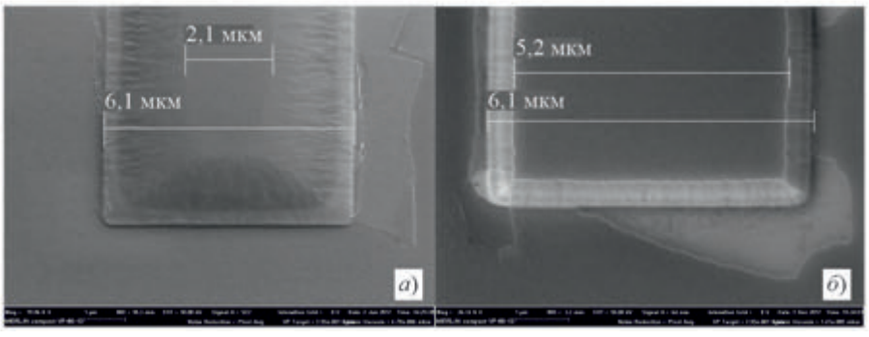

Рис. 3. Мезы для размещения транзистора:
а – размер основания мезы 6100 нм, размер вершины мезы 2100 нм, высота мезы 160 нм;
б – размер основания мезы 6100 нм, размер вершины мезы 5200 нм, высота мезы 160 нм

Предположительно, отделение фоторезиста от поверхности полупроводника вызвано высоким уровнем легирования донорами (Si) слоя № 22, поскольку при травлении нелегированных слоев GaAs в перекисно-сернокислотном травителе такого эффекта не наблюдалось – травление проходило преимущественно в вертикальном кристаллографическом направлении ⟨100⟩ и формировало классический профиль либо с вертикальными стенками, либо с небольшим отрицательным наклоном.

Сильный наклон боковых стенок мезы упрощает формирование омических контактов непосредственно к слою канала (рис. 4). При этом n^+-рекристаллизованные области контактов приобретают увеличенный горизонтальный размер под боковыми стенками (для угла наклона 80 град при толщине канала 10 нм этот размер примерно равен 130 нм). Сопротивление омического контакта складывается из сопротивления прозрачного для туннелирования электронов барьера Шоттки и сопротивления n^+-рекристаллизованной области. Из-за большого количества дефектов удельное сопротивление рекристаллизованных областей больше удельной электропроводности областей канала, примыкающих к n^+-рекристаллизованным областям. Необходимость минимизации в мощных СВЧ-транзисторах переходного сопротивления контакта металл-полупроводник, включая сопротивления n^+-рекристаллизованных областей, а также перспектива использования DA-pHEMT в цифровых схемах требуют уменьшения наклона боковых стенок. В частности, для мощных СВЧ-транзисторов для формирования омических контактов оптимальным представляется формирование боковых стенок транзисторной мезы, имеющих наклон 15…30 град относительно нормали к поверхности структуры.

Для формирования плоских боковых стенок транзисторной мезы с таким углом наклона было решено использовать «РИЛТ», т. е. реактивно-ионно-лучевое травление, представляющее собой объединение в одном процессе плазмохимического и ионно-лучевого травления в BCl_3+Ar [10] при рабочем напряжении 500 В. При таком травлении достигается дополнительный эффект распыления слоев структуры в плазме аргона. При этом наклон стенок мезы обеспечивается использованием оплавленного (термообработка при 150 °С в течение 2 мин) фоторезиста SPR-700, край которого после оплавления принимает клиновидную форму (рис. 5, *а*). В процессе травления клиновидный край резиста подвергается распылению и частично стравливается, тем самым открывая все большую часть горизонтальной поверхности структуры для взаимодействия с плазмой, что и обеспечивает формирование наклона боковых стенок мезы.

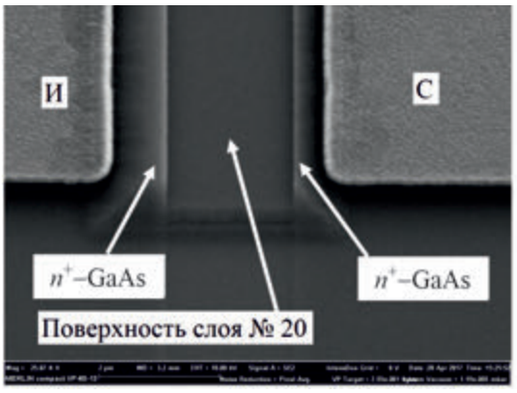

Рис. 4. Омические контакты истока и стока на боковых стенках транзисторной мезы, сформированной химическим травлением в H_2O_2:H_2SO_4

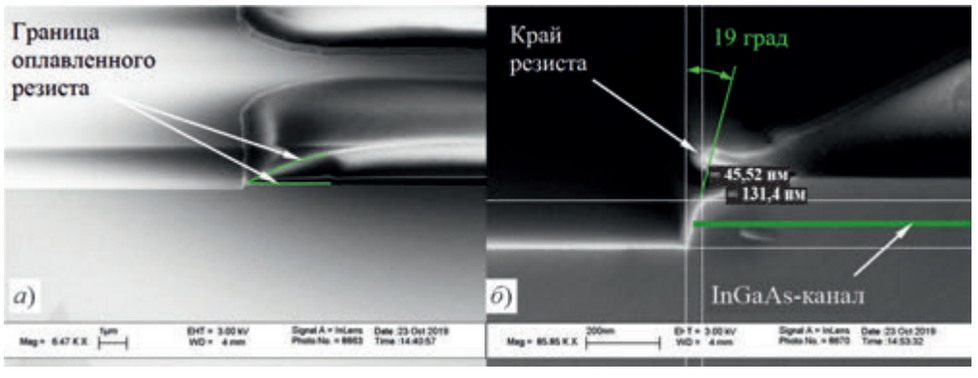

Рис. 5. Клиновидный край оплавленного фоторезиста (*а*) и боковая стенка транзисторной мезы (*б*), сформированная начальным травлением в H_2O_2:H_2SO_4 с последующим РИЛТ в BCl_3+Ar

Важно, что включение дополнительного эффекта распыления слоев структуры в плазме аргона ослабляет влияние разных величин химических потенциалов слоев гетероструктуры на скорость их травления. Это ослабление позволяет получить форму боковых стенок транзисторной мезы, близкую к плоской, что вместе с обеспечением нужного наклона боковых стенок дает возможность сформировать омические контакты непосредственно к слою канала.

На рис. 5, *б* хорошо виден эффект отделения фоторезиста от поверхности полупроводника в области химического травления в H_2O_2:H_2SO_4, приводящий к формированию области сильного наклона боковой стенки мезы с углом около 85 град относительно нормали к поверхности структуры. Хорошо видно, что последующее РИЛТ в BCl_3+Ar приводит к формированию практически плоской поверхности боковой стенки транзисторной мезы, имеющей угол отклонения от нормали 19 град. Такая величина угла позволяет проводить вертикальное напыление металлизации омического контакта (например, Au:Ge/Ni/Au) на боковые стенки мезы транзистора и после вжигания сформировать омические контакты непосредственно к слою канала транзистора. При этом в случае исключения предварительного травления в H_2O_2:H_2SO_4 достаточно малая величина угла наклона обеспечивает минимизацию длины канала транзистора. Боковая стенка транзисторной мезы, сформированная только РИЛТ-методом, показана на рис. 6.

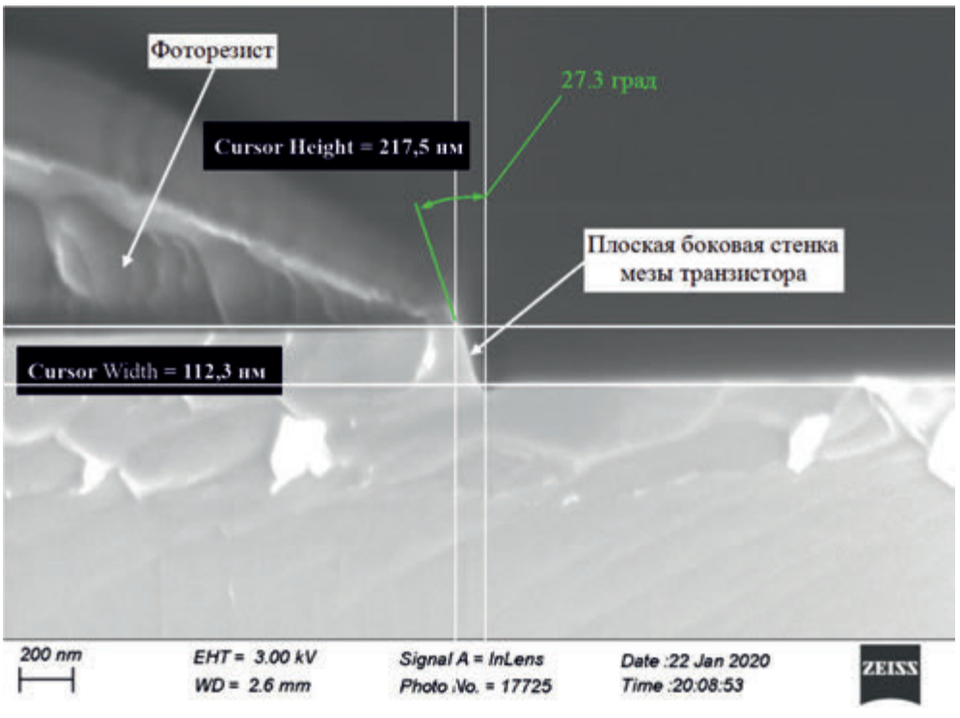

Рис. 6. Боковая стенка транзисторной мезы, сформированная РИЛТ-методом в плазме BCl_3+Ar при клиновидной форме края оплавленного фоторезиста

Как видно из рис. 6, методом РИЛТ с использованием оплавленного резиста получена плоская боковая стенка транзисторной мезы с углом наклона по отношению к нормали 27,3 град. Такой угол обеспечивает нанесение металлизации омических контактов на боковую стенку мезы при вертикальном напылении и позволяет сформировать омические контакты с малой величиной сопротивления. Эта технология, даже при несколько завышенном времени вжигания омических контактов, была успешно использована в работе [2], показавшей возможность формирования DA-DpHEMT мм-диапазона на основе AlGaAs/InGaAs/AlGaAs-гетероструктур, работоспособных на частотах до 100 ГГц. В частности, на частоте 40 ГГц был получен максимальный стабильный коэффициент усиления мощности (MSG) в 22 дБ, а на частоте 67 ГГц – в 14 дБ.

Важно отметить, что при угле наклона боковых стенок транзисторной мезы 19 град на них при вертикальном напылении формируется металлизация толщиной примерно в 3 раза меньше, чем на горизонтальных участках (см. рис. 1). По этой причине время вжигания контактов должно подбираться исходя из толщины металлизации на боковых стенках. Например, если при толщине Au:Ge 10 нм на горизонтальной поверхности оптимальным для минимизации сопротивления контакта является время вжигания 30 с, то для контакта на боковой стенке мезы ожидается оптимальное время вжигания около 10 с. Это требование следует из того, что такой омический контакт представляет собой прозрачный для туннелирования электронов потенциальный барьер Шоттки. Понятно, что обеспечение хорошего туннелирования требует наличия избыточной толщины слоя Au:Ge в сформированном контакте (смотри, например, [11]), где создавались омические контакты Au:Ge/Ni/Au (200/30/120 нм) с толщиной слоя Au:Ge 200 нм. При недостаточной толщине слоя Au:Ge практически весь эвтектический сплав Au:Ge перейдет в рекристаллизованную область, а это приведет к уменьшению средней концентрации электри-

чески активных доноров (Ge) в рекристаллизованной области, а также вероятности туннелирования электронов сквозь потенциальный барьер контакта и увеличению сопротивления n^+-рекристаллизованных областей омических контактов.

Следствие – формирование омического контакта с повышенным сопротивлением при избыточно большом времени вжигания и недостаточно большой толщине слоя Au:Ge на боковой вой стенке мезы. Предположительно, при угле наклона боковых стенок мезы, равном примерно 27 град (см. рис. 6), оптимальной является толщина n^+-рекристаллизованной области 6…12 нм, при которой обеспечиваются хорошее туннелирование электронов сквозь потенциальный барьер контакта и минимизация сопротивления n^+-рекристаллизованных областей омических контактов (см. рис. 1).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объединение в одном процессе плазмохимического травления слоев гетероструктуры в плазме BCl_3 и распыления слоев гетероструктуры в плазме Ar (РИЛТ-процесс) при сопутствующем распылении и частичном травлении клиновидного края оплавленного фоторезиста позволяет формировать плоские боковые стенки у транзисторной мезы в DA-DpHEMT-гетероструктуре с углом наклона по отношению к нормали к поверхности структуры, равным 15…30 град.

Эта возможность позволяет сформировать омические контакты истока и стока на боковых стенках мезы непосредственно к слою InGaAs-канала. При формировании омических контактов на основе металлизации Au:Ge/Ni/Au необходимо учитывать уменьшенную толщину Au:Ge на боковых стенках мезы и необходимость сохранения на них избыточности этой толщины по отношению к количеству эвтектики Au:Ge, растворенной в рекристаллизованных областях омических контактов. Это условие дает возможность получить большую концентрацию Ge в рекристаллизованных областях InGaAs-канала, обеспечить интенсивный туннельный перенос электронов сквозь барьеры омических контактов «металл – n^+–InGaAs» и получить малое переходное сопротивление омических контактов. Избыточность толщины Au:Ge на боковых стенках мезы обеспечивается достаточно большой толщиной слоя Au:Ge на боковых стенках мезы и уменьшением времени вжигания контактов по отношению к времени вжигания для омических контактов с горизонтальной плоскостью контакта.

Предположительно, метод формирования омических контактов непосредственно к слою канала, выходящему на боковые стенки транзисторной мезы, может быть с успехом использован в конструкции омических контактов для AlGaN/AlN/GaN полевых транзисторов с GaN-каналом, при этом омические контакты истока и стока формируются к слою GaN-канала, выходящему на боковые стенки транзисторной мезы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Medjdoub, F.** / F. Medjdoub // Gallium Nitride (GaN) Physics, Devices and Technology. – CRC Press, Taylor and Francis Group, 2016.

2. **Deen, A.** / A. Deen, D. F. Storm, D. J. Meyer, R. Bass, S. C. Binari, T. Gougousi, K. R. Evans // Appl. Phys. Lett. – 2014. – Vol.105, No 093503.

3. **Zimmerman, T.** / T. Zimmerman // IEEE Electron Dev. Lett. – 2008 . – Vol. 29, No 661.

4. **Протасов, Д. Ю.** Рассеяние электронов в гетероструктурах AlGaN/GaN с двумерным электронным газом / Д. Ю. Протасов, Т. В. Малин, А. В. Тихонов, А. Ф. Цацульников, К. С. Журавлев // ФТП. – 2013. – Т. 47, вып. 1.

5. **Журавлев, К. С.** Нормально закрытые транзисторы на основе in situ пассивированных гетероструктур AlN/GaN / К. С. Журавлев, Т. В. Малин, В. Г. Мансуров, В. Е. Земляков, В. И. Егоркин, Я. М. Парнес // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, вып. 14.

6. **Лукашин, В. М.** Перспективы развития мощных полевых транзисторов на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, К. С. Журавлев, А. И. Торопов, В. Г. Лапин, Е. И. Голант, А. А. Капралова // ФТП. – 2014. – Т. 48, вып. 5. – С. 684 – 692.

7. **Pashkovskii, Andrey B.** Milimeter wave donor-acceptor doped DpHEMT / Andrey B. Pashkovskii, Sergey A. Bogdanov, Askhat K. Bakarov, Alexandr B. Grigorenko, K. S. Zhuravlev, Vladimir G. Lapin, Vladimir M. Lukashin, Ilya A. Rogachev, Evgeniy V. Tereshkin and Sergey V. Shcherbakov // IEEE Trans. on Electron Devices. – Jan. 2021. – Vol. 68, issue 1. – P. 53 – 56.

8. **Mills, A. P.** Mechanisms for Si dopant migration in molecular beam epitaxy $Al_xGa_{1-x}As$ / A. P. Mills, Jr., L. N. Pfeiffer, K. W. West // Journal of Applied Physics. – 2000. – Vol. 88, No 7.

9. **Baca, A. G.** Fabrication of GaAs devices/ A. G. Baca, Carol I. H. Ashby. – Institution of Engineering and Technology, UK, 2009.

10. Плазменная технология в производстве СБИС / Под ред. Н. Айнспрука и Д. Брауна. – М.: Мир, 1987.

11. **Sung-Jin Cho.** High power density AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMTs using an optimized manufacturing process for *Ka*-band applications / Sung-Jin Cho, Cong Wang, Nam-Yong Kim // Microelectronic Engineering. – 2014. – Vol. 113. – P. 11 – 19.

Статья поступила 29 июня 2021 г.

НОВЫЕ КНИГИ

БОРИСОВ А. А., БУРОБИН В. А. **Обзор современных технологий гетероинтеграции многокомпонентных полупроводниковых соединений A^3B^5 и кремниевых КМОП для внедрения на рынки оборонной и гражданской продукции.** – Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 256 с.

В центре внимания данного обзора – значительные достижения в области гетерогенной интеграции GaN и других многокомпонентных полупроводников на платформе Si КМОП. Такой подход становится основой нового класса высокотехнологичных многофункциональных микросхем, характеристики которых будут несравненно выше по сравнению с любыми существующими аналогами при значительном снижении себестоимости.

Наличие «интеллектуальных» ИС (микросистем и датчиков на кристалле) окажет огромное влияние на широкий спектр компонентов микро- и наноэлектроники и приведет к новой технической революции.

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.382

ОБЗОР ЦИФРОВЫХ ДРАЙВЕРОВ УПРАВЛЕНИЯ СВЧ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ GaAs-ТЕХНОЛОГИИ

Д. В. Билевич

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Представлен обзор цифровых драйверов управления для СВЧ многофункциональных интегральных схем на основе GaAs-технологии. Описаны параллельные и последовательно-параллельные драйверы, их составные блоки, а также типы логических схем для GaAs-технологии. Проведено сравнение девятнадцати схемных решений, установлены типовые характеристики драйверов, в том числе установлено, что минимальное энергопотребление последовательно-параллельных драйверов составляет 2,3 мВт/разряд. Выявлены наиболее используемые решения для технологий как с нормально открытыми транзисторами, так и позволяющих изготовить нормально открытые и нормально закрытые варианты транзисторов. Найдены решения, позволяющие снизить энергопотребление драйверов.

КС: СВЧ МФИС, GaAs pHEMT, последовательно-параллельные преобразователи, цифровые схемы управления, параллельные драйверы управления

A REVIEW OF THE DIGITAL CONTROL LOGIC FOR GaAs CORE-CHIP

D. V. Bilevich

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

A review of the digital control logic for GaAs core-chip is presented. Parallel and serial-to-parallel drivers, their component blocks, as well as logic circuits families for GaAs technology are described. A comparison of 19 solutions was carried out. The typical characteristics of the drivers were found. In particular, the minimum power consumption of serial-to-parallel drivers is 2.3 mW/bit. The most used circuit solutions have been found both for D-mode process and for E/D-mode process. Approaches to decrease power consumption were found.

Keywords: core-chip, GaAs pHEMT, serial-to-parallel converter, digital control logic, parallel driver

1. ВВЕДЕНИЕ

Многофункциональные интегральные схемы СВЧ-диапазона (СВЧ МФИС, англ. *core-chip*) состоят из различных функциональных блоков (ФБ), предназначенных для усиления, фильтрации, управления амплитудой и фазой сигнала. К устройствам управления относятся: коммутаторы, аттенюаторы, фазовращатели и блоки цифрового управления. Далее для обозначения коммутаторов, аттенюаторов и фазовращателей будет использоваться термин «устройства с пе-

ременными состояниями» (УПС). Управление состояниями таких устройств осуществляется с помощью отдельной схемы, называемой драйвером. Разрядность УПС определяется количеством секций, входящих в их состав, и задает число коммутируемых выходов, шаг или диапазон управления амплитудой и фазой. Такие устройства изменяют амплитуду и фазу проходящего через них сигнала в зависимости от того, в каком состоянии они находятся. Каждая из секций управляется при помощи ключевых устройств, например транзистора, работающего в ключевом режиме. Большинство схем УПС требует подачи одновременно как прямого, так и инверсного управляющего сигнала для изменения их состояния. Такую пару называют парафазными сигналами.

В настоящее время СВЧ МФИС изготавливаются на основе различных технологий: GaAs [1], Si [2], GaN [3], SOI [4]. В данной статье рассматриваются СВЧ МФИС на основе GaAs HEMT-технологии. Типичные значения напряжения отсечки для транзисторов, изготовленных по такой технологии, составляют -0,8 В и ниже. Стоит отметить, что через УПС передаются сигналы высокой мощности. Такие сигналы могут устанавливать отрицательные напряжения на стоке и истоке ключевого транзистора. Чтобы надежно запереть ключевой транзистор, напряжение на затворе выбирают значительно ниже напряжения отсечки, например от -3 до -5 В. Для того чтобы его открыть, используют напряжение 0 В. Управление СВЧ МФИС осуществляется при помощи цифрового сигнала уровня ТТЛ, для которой характерны значения напряжений для логического нуля 0 В и для логической единицы +5 В. Поэтому блок цифрового управления решает две задачи: преобразование сигнала уровня ТТЛ в уровень GaAs-логики и реализация на выходе разряда драйвера парафазных сигналов для управления УПС.

Для управления одной секцией УПС используется один разряд драйвера. В зависимости от способа передачи управляющего сигнала различают два вида драйверов: параллельный и последовательно-параллельный. В параллельном драйвере на каждый разряд подаётся свой управляющий сигнал. Количество контактных площадок (КП) управления такого драйвера равно разрядности. Входной цифровой сигнал уровня ТТЛ конвертируется в сигнал уровня GaAs-логики. При помощи инвертора на выходе разряда драйвера формируются парафазные сигналы. Параллельный драйвер обладает небольшой потребляемой мощностью, высокой скоростью установки состояния и относительной простотой проектирования топологии.

В последовательно-параллельном драйвере используется обычно три основных управляющих сигнала. Входной цифровой сигнал состоит из последовательности логических нулей и единиц. В зависимости от кодового слова, на выходах драйвера устанавливается напряжение для переключения разрядов функциональных блоков в требуемое состояние [5]. Для работы последовательно-параллельного драйвера необходимо, как минимум, четыре КП. Максимальное число КП в рассмотренных работах равно семи. При этом число КП не зависит от разрядности, в отличие от параллельных драйверов. Однако структура самого драйвера сложнее, и на кристалле он может занимать больше места, чем параллельный. В активных фазированных антенных решетках (АФАР) или антеннах MIMO (*multiple input multiple output*) имеется множество МФИС, работающих совместно. Иногда их соединяют последовательно, а в драйвер добавляют дополнительный выход для передачи кодового слова далее по цепочке. Это позволяет уменьшить количество сигнальных шин в устройстве и упростить управление СВЧ МФИС.

2. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ДРАЙВЕР

На входе разряда параллельного драйвера находится схема преобразования уровня сигнала, которая обеспечивает переход от сигнала уровня ТТЛ к уровню GaAs-логики. Данная схема состоит из блока последовательно соединенных диодов и транзистора, подключенного по схеме с общим истоком. Количество последовательно соединенных диодов зависит от многих факторов, и заранее их количество не известно. Далее в статье данный блок будем обозначать как два диода и многоточие между ними. Чтобы получить парафазные сигналы, используется либо дифференциальная схема инвертора с двумя выходами, либо два инвертора последовательно, а сигналы снимаются после каждого из них. На рис. 1 представлена принципиальная схема одного разряда параллельного драйвера [6]. В данном типе драйвера все разряды идентичны.

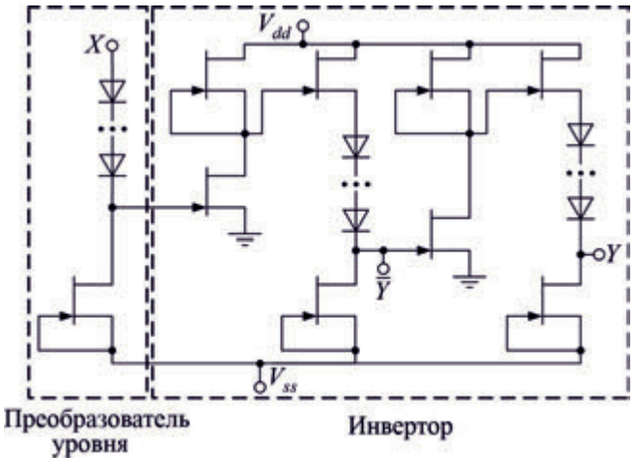

Рис. 1. Принципиальная схема разряда параллельного драйвера

В работе [7] представлен вариант реализации параллельного драйвера с добавлением генератора напряжения. Генератор задаёт напряжение смещения на инверторах. В данном решении инверторы включены в дифференциальном режиме, что снижает влияние температуры и технологического разброса на характеристики устройства. Все разряды драйвера имеют общий генератор напряжения. Схема такого параллельного драйвера показана на рис. 2.

Рис. 2. Схема параллельного драйвера

Принципиальная схема разряда такого драйвера вместе с генератором напряжения представлена на рис. 3.

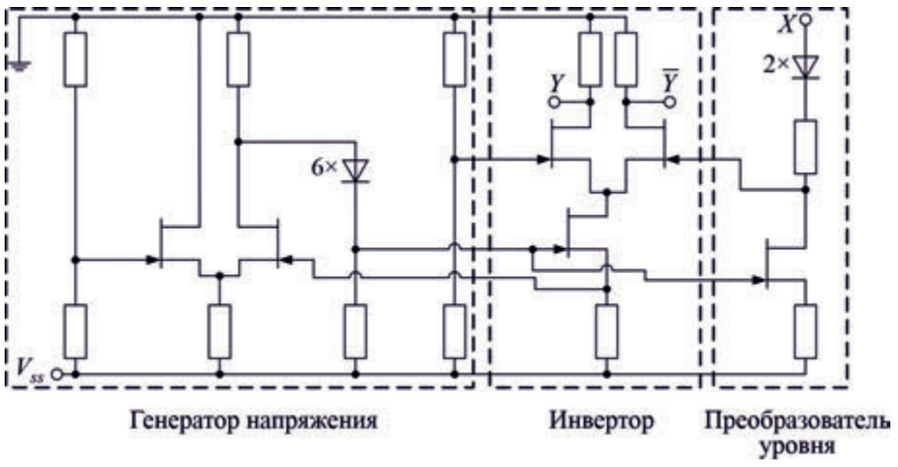

Рис. 3. Принципиальная схема разряда параллельного драйвера с генератором

В работе [8] предлагается использовать резисторы вместо шести диодов в блоке генератора напряжения смещения (рис. 4).

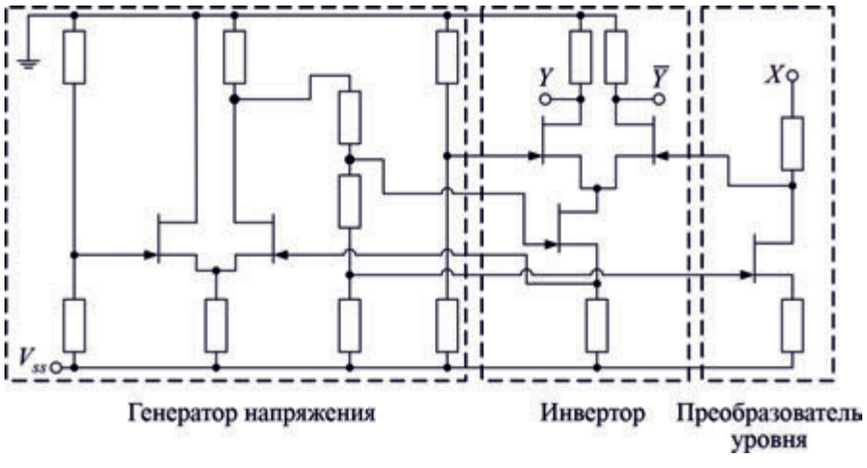

Рис. 4. Принципиальная схема модификации разряда параллельного драйвера с генератором

Это позволяет не только избежать большого температурного разброса характеристик, но и понизить напряжение питания с -7,5 до -5 В и таким образом снизить потребляемую мощность.

3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ДРАЙВЕР

В отличие от параллельного, на вход последовательно-параллельного драйвера подается цифровой сигнал, содержащий последовательность логических нулей и единиц (логических символов), которая несет в себе информацию о том, в какое состояние необходимо переключить секции УПС. Последовательно-параллельные драйверы состоят из следующих функциональных блоков: входной преобразователь напряжения (ВхПН), регистр хранения,

регистр сдвига и выходной преобразователь напряжения (ВыхПН). Структурная схема такого драйвера представлена на рис. 5. На вход драйвера подаются три сигнала: информационный сигнал *D*, тактовый сигнал *CLK* и сигнал разрешения записи состояния *LE*. Информационный сигнал *D* содержит в себе последовательность из логических символов, для обозначения такой последовательности будем использовать термин «кодовое слово». По тактовому сигналу *CLK* происходит последовательная запись битов кодового слова в регистр сдвига. Сигнал записи данных *LE* предназначен для записи кодового слова в регистр хранения и установки состояний УПС.

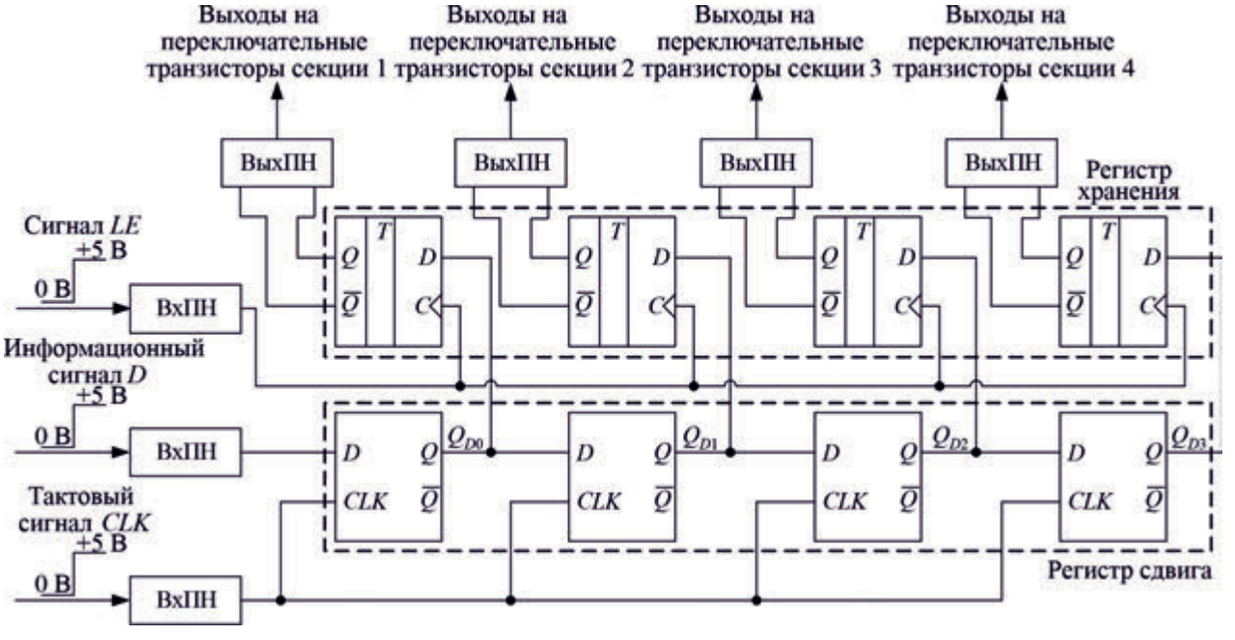

Рис. 5. Структурная схема последовательно-параллельного драйвера

ВхПН служит для преобразования внешних логических уровней (0 В и +5 В) в уровни GaAs-логики, которые зависят от выбранного типа логических схем. На вход последовательно-параллельного драйвера приходит кодовое слово, содержащее состояние секций УПС. В регистре сдвига по тактовому сигналу *CLK* происходит перемещение логических символов кодового слова. На каждый такт сигнала логический символ перемещается в следующий разряд регистра. Запись кодового слова в регистр хранения происходит по сигналу *LE*. На рис. 6 показаны временные диаграммы последовательно-параллельного драйвера.

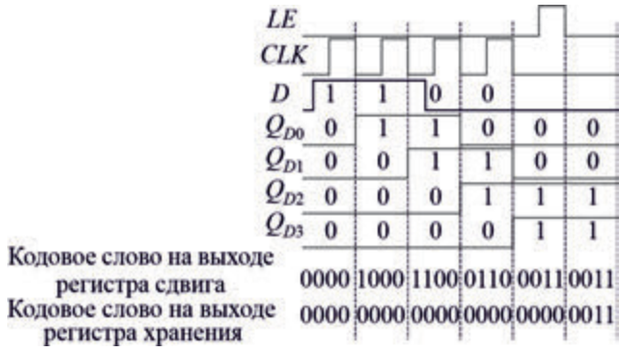

Рис. 6. Временные диаграммы последовательно-параллельного драйвера

Таким образом, на выходах драйвера кодовое слово устанавливается в обратном порядке, т. е. символ, подающийся на вход первым, будет установлен на самом дальнем от входа регистре. ВыхПН используется, если значения напряжений для внутренних логических уровней отличаются от тех, которыми управляются ключевые транзисторы в секциях УПС.

Каждый из блоков имеет несколько различных реализаций, которые зависят от значений напряжения для логических символов и типа логических схем, использующихся для реализации регистра сдвига и регистра хранения. Подробнее о существующих типах логических схем будет рассказано в следующем разделе. Регистр сдвига, регистр хранения и ВыхПН формируют один разряд последовательно-параллельного драйвера.

Наиболее распространенные варианты реализации ВхПН представлены на рис. 7.

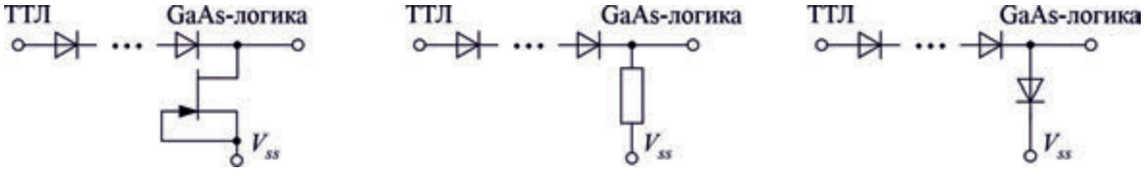

Рис. 7. Варианты реализации ВхПН

Вывод V_{ss} может подключаться к земле, если требуются положительные значения логических уровней, или к отрицательному источнику питания, если логические уровни отрицательные [9, 10].

Регистр сдвига формируется из динамических *D*-триггеров. *D*-триггер имеет информационный вход *D* и тактовый вход *CLK*. По сигналу *CLK* на выходе *Q* устанавливается тот же логический уровень, что и на информационном входе *D*. Динамический *D*-триггер производит запись информации по фронту тактового сигнала *CLK*. Помимо динамических *D*-триггеров существуют статические *D*-триггеры, которые записывают информацию пока тактовый сигнал *CLK* имеет высокий уровень (режим прозрачности).

Существует несколько вариантов реализации динамического *D*-триггера. Наиболее распространённая реализация показана на рис. 8 [9–14]. Также в новых работах [15, 16] используются *D*-триггеры, составленные из ведущего и ведомого триггеров (рис. 9).

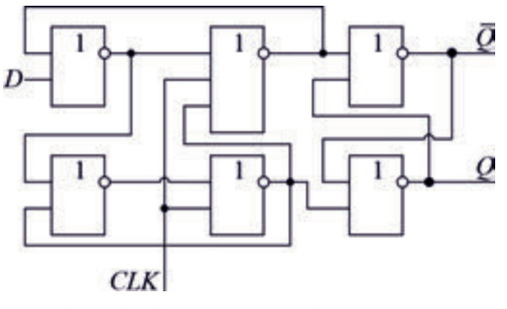

Рис. 8. *D*-триггер, работающий по отрицательному фронту

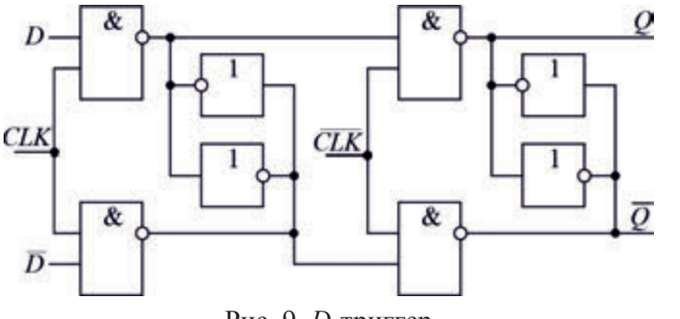

Рис. 9. *D*-триггер по схеме ведущий-ведомый

В обоих вариантах передача данных осуществляется по отрицательному фронту тактового сигнала *CLK*. Однако для работы *D*-триггера по схеме ведущий-ведомый необходимо обеспечить на входе парафазные информационные сигналы *D*, $\overline{D}$ и тактовые сигналы *CLK*, $\overline{CLK}$.

Для корректной работы *D*-триггера необходимо обеспечить достаточное время предустановки t_{setup} и достаточное время удержания t_{hold}. Информационный сигнал *D* должен оставаться не-

изменным в течение времени t_{setup} до срабатывания и в течение t_{hold} после срабатывания. Ограничения появляются из-за задержки распространения на логических элементах внутри *D*-триггера. Если не соблюсти данные условия, логическим элементам не хватит времени для установки определённых состояний, что приведёт к ошибке в работе триггера.

Для определения значений t_{setup} и t_{hold} используют метод, представленный в [17]. В данном методе строится зависимость задержки распространения от значения $t_{D\text{-}CLK}$, которое означает промежуток времени от срабатывания по фронту сигнала *CLK* до сброса информационного сигнала *D*. Зависимости $t_{pd}(t_{setup})$ и $t_{pd}(t_{hold})$ имеют схожий вид, график зависимости $t_{pd}(t_{setup})$ представлен на рис. 10.

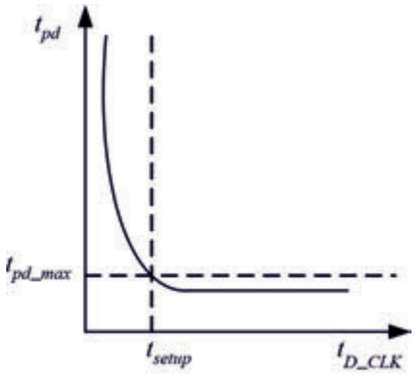

Рис. 10. Зависимость времени задержки распространения от времени предустановки

Значение t_{setup} равно времени предустановки, при котором задержка распространения увеличивается на 10 % от значения при нормальной работе *D*-триггера. Уменьшение времени предустановки приводит к получению импульсов малой длительности. При этом фронты сигнала начинают влиять на время задержки, а после определенного значения *D*-триггер прекращает работать, не успевая реагировать на сигнал малой длительности. Подобное наблюдается и для зависимости задержки распространения от времени удержания.

В качестве регистра хранения могут выступать как динамические *D*-триггеры, рассмотренные выше, так и статические, например показанный на рис. 11.

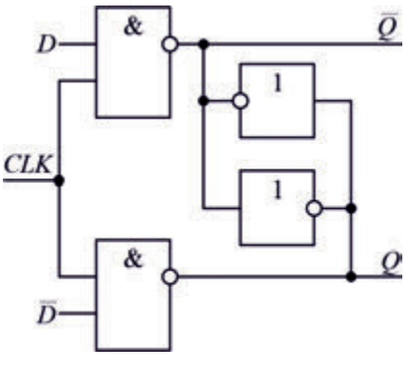

Рис. 11. Статический *D*-триггер

Такое исполнение регистра хранения позволяет сэкономить потребляемую мощность и место на кристалле СВЧ МФИС [16].

Секции УПС в СВЧ МФИС управляются при помощи ключевых транзисторов. Для управления такими транзисторами необходимо обеспечить уровни напряжения 0 В (для установки ключевого транзистора в открытое состояние) и -1,5 В и ниже (для установки ключевого транзистора

в закрытое состояние), в зависимости от напряжения отсечки ключевого транзистора. Если логические уровни внутренних схем не совпадают с управляющими напряжениями ключевого транзистора, то в драйвере используют ВыхПН.

К характеристикам цифровых драйверов управления относят разрядность, напряжение и количество источников питания, потребляемую мощность, занимаемую на кристалле площадь и быстродействие. Разрядность драйвера определяется количеством секций УПС. Под быстродействием понимается максимальная частота тактового сигнала *CLK*, при которой регистры сдвига и хранения работают корректно.

4. ТИПЫ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ

Логические схемы на полевых транзисторах (ПТ) с непосредственными связями (НСПТ, англ. *direct coupled FET logic – DCFL*). Данный тип логических схем является наиболее распространенным благодаря простоте реализации, минимальной занимаемой площади и высокому быстродействию [18, 19]. Для реализации таких схем используются как нормально открытые (НО), так и нормально закрытые транзисторы (НЗ). В качестве нагрузки в данных схемах могут использоваться обычные ПТ, ПТ без затвора или резисторы (рис. 12).

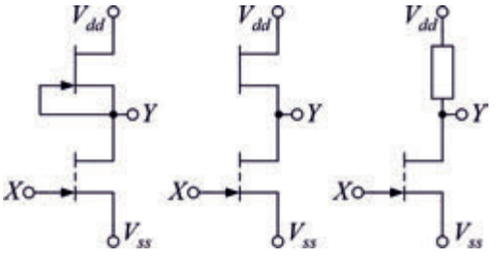

Рис. 12. Схемы типа НСПТ

Типичные уровни напряжения для НСПТ схем: 0 В для логического нуля и 0,8…1 В для логической единицы. Из-за небольшой разницы между уровнями логических символов данный тип схем обладает низким значением запаса помехоустойчивости. Добавление истокового повторителя на выход НСПТ-схемы (рис. 13) позволяет без потери быстродействия схемы увеличить разницу между уровнями логических символов и коэффициент разветвления, который обозначает количество логических элементов, которые можно подключить к выходу инвертора [20].

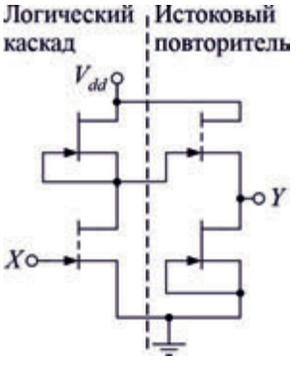

Рис. 13. Схема типа НСПТс истоковым повторителем

Логические схемы на ПТ с буферным каскадом (БПТ, англ. *buffered FET logic – BFL*). Для работы такого типа логических схем необходимы два источника питания с разной полярностью. Базовая схема инвертора состоит из логического каскада и каскада понижения уровня напряжения [21]. Под логическим каскадом подразумевается часть схемы, которая отвечает за инвертирование входного сигнала. На выходе логического каскада на НО-транзисторах уровни напряжения логических символов не подходят для управления последующим инвертором. Поэтому в схему добавляется каскад понижения уровня напряжения. Данная схема состоит из диодов Шоттки (рис. 14). Это позволяет сформировать уровни напряжения логических символов на выходе инвертора, необходимые для управления НО-транзистором, стоящим на входе следующего за ним инвертора. Количество диодов определяется напряжением отсечки НО-транзистора.

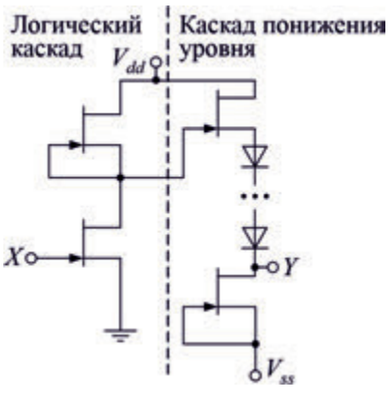

Рис. 14. Схема типа БПТ

Наличие истокового повторителя в буферном каскаде обеспечивает высокое быстродействие. Для такого типа логических схем характерна высокая потребляемая мощность. В работе [22] была предложена модификация, позволяющая снизить потребляемую мощность почти в четыре раза. Типичные уровни напряжения в таком типе логических схем: -3 В для логического нуля и 0 В для логической единицы. Стоит отметить, что уровень напряжения логического нуля зависит от выбора напряжений источников питания, напряжения отсечки и ширины затвора используемых транзисторов и может иметь значение вплоть до -1 В.

Логические схемы на ПТ с диодами Шоттки (ДШПТ, англ. *Schottky diode FET logic* – SDFL). В данном типе логических схем в качестве переключающего транзистора используются НО-транзисторы. Для такой схемы необходимы два источника питания с разной полярностью [23]. Каскад понижения уровня в ДШПТ выполняет ту же функцию, что и в БПТ, но в данном типе схем размещен перед логическим каскадом (рис. 15).

Типичные уровни напряжения для ДШПТ-схем: от 0 до 0,2 В для логического нуля и от 1,5 до 3 В для логической единицы, в зависимости от напряжений источников питания. Иногда для увеличения нагрузочной способности логической схемы типа ДШПТ на выход схемы добавляется истоковый повторитель (рис. 16).

В данном типе логических схем используются только НО-транзисторы. Напряжение отсечки НО-транзисторов по модулю превышает значение напряжения отсечки НЗ-транзисторов, что позволяет достигать больших перепадов напряжения логических символов и лучшей помехо-

устойчивости. Однако из-за большого количества элементов возрастают занимаемая площадь и потребляемая мощность.

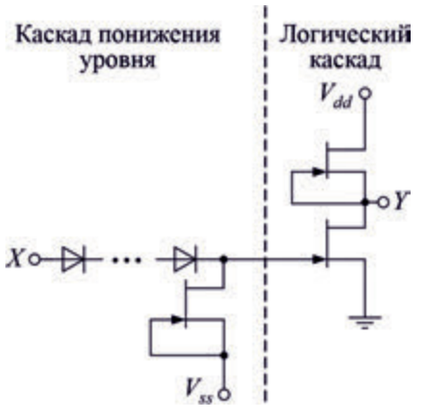

Рис. 15. Схема типа ДШПТ

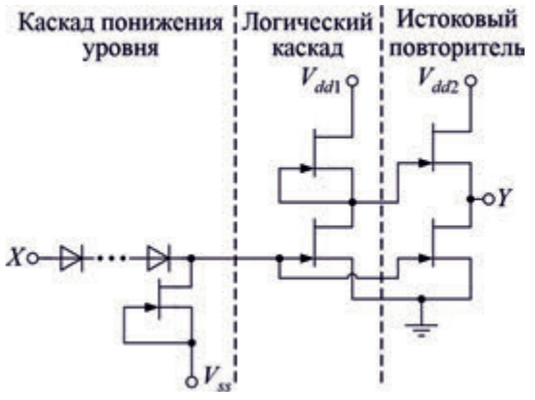

Рис. 16. Схема типа ДШПТ с истоковым повторителем

Логические схемы на ПТ с псевдокомплементарными связями (ПКПТ, англ. *pseudo-complementary FET logic – PCFL*). В данном типе логических схем используются лишь НЗ-транзисторы. Главным преимуществом данной схемы является низкая потребляемая мощность. Однако для управления такими схемами используются парафазные управляющие сигналы. Структура ПКПТ1 [24] содержит большее количество транзисторов (рис. 17), за счет чего возрастает занимаемая площадь.

Разница между уровнями напряжения логических символов и запасом помехоустойчивости для ПКПТ-схем меньше, чем для НСПТ. Также наблюдается снижение уровня напряжения на выходе с увеличением частоты сигнала на входе. Для того чтобы уменьшить влияние данного эффекта, была предложена модифицированная схема ПКПТ2 [24] (рис. 18).

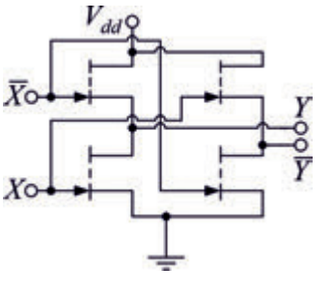

Рис. 17. Схема типа ПКПТ1

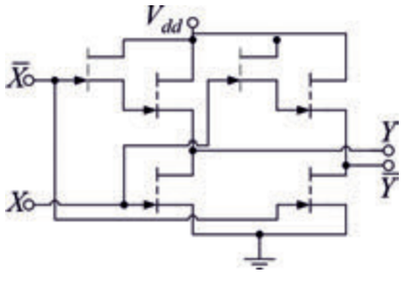

Рис. 18. Схема типа ПКПТ2

Схема ПКПТ2 способна работать на более высоких частотах, однако при этом возрастает размер схемы на кристалле. Также незначительно повышается потребляемая мощность.

Схема ПКПТ3 была разработана для применения в схемах с очень высокой рабочей частотой и низким энергопотреблением (рис. 19) [25]. По сравнению с ПКПТ2, здесь добавлен транзистор для компенсации тока утечки. Затвор этого транзистора подключен к выходу *Y*. Когда входной транзистор открывается и на выходе формируется низкий логический уровень,

транзистор, подключенный к *Y*, надежно запирается, уменьшая значение утечки, что приводит к снижению потребляемой мощности.

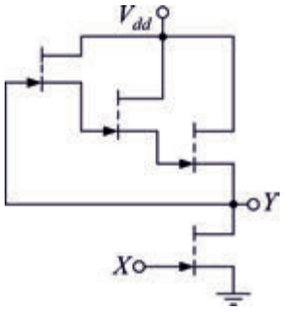

Рис. 19. Схема типа ПКПТ3

5. БЫСТРОДЕЙСТВИЕ ЦИФРОВЫХ ДРАЙВЕРОВ УПРАВЛЕНИЯ

Быстродействие СВЧ МФИС определяется характеристиками цифрового драйвера управления и временем переключения УПС. Для оценки быстродействия эти параметры должны рассматриваться совместно. Длительность нарастания УПС $t_{нар}$ определяется как время, за которое уровень огибающей радиочастотного сигнала на выводах ключевого транзистора увеличивается от 10 до 90 % мощности. Длительность спада $t_{сп}$ определяется при падении мощности сигнала от 90 до 10 %. Длительность включения $t_{вкл}$ – это время между достижением 50 % уровня управляющего сигнала и 90 % максимального значения мощности радиочастотного сигнала. Длительность выключения $t_{выкл}$ – между 50 % уровня управляющего сигнала и 10 % мощности радиочастотного сигнала [26]. Для краткости большее значение из длительности нарастания и спада будем называть длительностью изменения фронтов $t_{фронт}$, а большее из длительности включения и выключения – временем переключения $t_{перекл}$.

Выход оконечного каскада цифрового драйвера подключают через цепь управления к затвору ключевого транзистора УПС. К затвору ключевого транзистора обычно подключают резистор большого номинала R_g для развязки СВЧ-сигнала и цепи управления. Вместе с входной емкостью ключевого транзистора C_{gs} этот резистор образует цепь с постоянной времени R_gC_{gs}, которая будет определять быстродействие ключа. Оконечные каскады драйвера состоят, как правило, из переключающего логического транзистора и нагрузочного резистора. Зарядка и разрядка емкости C_{gs} происходит, помимо резистора R_g, через нагрузочный резистор и переключающий транзистор оконечного каскада цифрового драйвера соответственно. При уменьшении номинала нагрузочного резистора оконечного каскада постоянная времени ключевого транзистора УПС уменьшается – быстродействие возрастает, но одновременно увеличивается потребляемый ток. Таким образом, требования высокого быстродействия логических схем и минимального потребления находятся в противоречии.

Типовые значения времени переключения составляют от единиц до сотен наносекунд. В разработанных в работе [27] фазовращателях в цепи затвора ключевых транзисторов используется резистор номиналом 2,5 кОм, что позволяет достичь времени длительности изменения фронтов порядка 1 нс. Среди коммерческих разработок цифровых ступенчатых аттенюаторов со встроенными параллельными драйверами можно найти как довольно быстрые изделия, например с $t_{фронт}$ = 10 нс и $t_{перекл}$ = 27 нс [28], так и более медленные, но с низким потреблением,

например с $t_{фронт} = 150$ нс и $t_{перекл} = 300$ нс [29]. Также в литературе отмечается, что для уменьшения задержки переключения цифровой драйвер управления и УПС следует размещать на кристалле как можно ближе друг к другу [30].

6. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДРАЙВЕРОВ

Различные варианты параллельных (П) и последовательно-параллельных (ПП) драйверов представлены в таблице. Здесь используются следующие сокращения: И – источник информации; Р – разрядность драйвер; РР – режим работы; ТТ – тип транзистора, используемого для реализации драйвера; $U_{пит}$ – напряжение питания; $I_{пот}$ – ток потребления; P – потребляемая мощность; S – занимаемая площадь на кристалле с учётом КП; f_{CLK} – максимальная или рабочая частота тактового сигнала *CLK*.

Характеристики драйверов управления

И	Р	РР	ТТ	$U_{пит}$, В	$I_{пот}$, мА	P, мВт	S, мм^2	f_{CLK}, МГц
[5]	8	ПП	НО/НЗ	2	–	186	1,3×1,1*	2100
[7]	5	П	НО	-7,5	–	–	1,5×0,4	–
[8]	14	П	НО	5	3,65	18,25	–	0,1
[11]	9	ПП	НО/НЗ	5/1/-5	–	415	1,8×0,8**	–
[13]	13	ПП	НО/НЗ	-3,6/-5	–	220	0,8×2,7*	40
[15]	27	ПП	НО/НЗ	5/-5	–	<70	3,5×1,12**	10
[16]	18	ПП	НО/НЗ	-3,3	13	43	0,35×1,82**	>50
[22]	12	ПП	НО	–	–	766	1,1×2,4	>100
[31]	16	ПП	НО/НЗ	5/2,5/-5	–	<70	0,5×2,6	20
[32]	13	ПП	–	-5±0,2	50	–	0,7×1,8**	20
[33]	15	ПП	–	5/2,5/-5	1/13/5	52	0,5×2,6	150
[34]	12	П	–	3,3/-5	9,5/35	206	0,62×2,57	–
[35]	12	ПП	–	3/-3	2/12	–	0,65×2,38	230
[36]	12	П	–	-7,5	16	120	2,75×0,4	–
[37]	12	ПП	НО/НЗ	-2,2	57	–	0,85×3,1	–
[38]	15	ПП	НО/НЗ	-2,2	40	–	3,4×0,78	24
[39]	4	ПП	НО/НЗ	5/-3	7,1/2,1	41,8	1,2×0,48**	62,5
[40]	1	ПП	НО	3,3/-3,3	–	700	–	3000
[41]	18	ПП	НО/НЗ	3,3/-3,3	<25	–	–	–

* Из источника не известно, учитываются КП или нет.

** Без учета КП.

Несмотря на многообразие типов логических схем, большинство последовательно-параллельных драйверов изготавливаются на основе НСПТ-схем. Если нет возможности реализовать НЗ-транзисторы на имеющейся технологии, то для реализации драйвера используются

БПТ-схемы. Главными недостатками схем БПТ являются высокая потребляемая мощность и большая площадь, занимаемая на кристалле.

В большинстве решений для последовательно-параллельных драйверов применяются не более двух источников питания, реже встречаются решения с использованием трех источников питания. Стандартными значениями напряжений источников питания являются ±3, ±3,3 и ±5 В. С одной стороны, меньшее значение напряжения на источнике питания позволяет уменьшить потребляемую мощность. С другой стороны, напряжение на выходе преобразователя напряжения, которое определяется отрицательным источником питания, должно быть достаточным для надежного запирания ключевых транзисторов в секциях УПС.

Последовательно-параллельный драйвер [22] на основе логики типа БПТ имеет наибольшую потребляемую мощность (64 мВт/разряд). Среди последовательно-параллельных драйверов наименьшую потребляемую мощность имеет решение [16] (2,3 мВт/разряд). Параллельный драйвер [8] имеет наименьшую потребляемую мощность среди всех рассмотренных решений (1,3 мВт/разряд).

Как говорилось ранее, последовательно-параллельные драйверы управляются кодовым словом. Различные реализации драйверов требуют особого содержания кодового слова. Обычно в кодовом слове содержится код состояния аттенюатора, код состояния фазовращателя и бит, управляющий коммутатором, переключающим режимы приема и передачи. В решении [32] кодовое слово содержит состояния для приемного и передающего тракта одновременно в нечетных и четных символах.

Частота работы большинства драйверов лежит в диапазоне от 10 до 60 МГц, однако встречаются варианты реализации с рабочей частотой выше 100 МГц.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен обзор возможных реализаций блока цифрового управления в СВЧ МФИС на основе GaAs. Были рассмотрены принципы работы, характеристики и способы реализации параллельных и последовательно-параллельных драйверов.

Большинство найденных последовательно-параллельных драйверов изготовлено на основе логических схем НСПТ. В случае, когда нет возможности реализовать НЗ-транзисторы, обычно используют логические схемы БПТ.

Структура последовательно-параллельного драйвера состоит из следующих блоков: ВхПН, регистр сдвига, регистр хранения и ВыхПН. В качестве регистра сдвига и регистра хранения в большинстве реализаций последовательно-параллельного драйвера используют последовательно подключенные динамические *D*-триггеры, состоящие из шести элементов ИЛИ-НЕ. Также встречаются решения, в которых в качестве регистра сдвига используют *D*-триггер, состоящий из ведущего и ведомого триггеров, а в качестве регистра хранения – статический *D*-триггер. Такая реализация позволяет уменьшить энергопотребление всего драйвера. Среди всех рассмотренных последовательно-параллельных драйверов драйвер с использованием таких триггеров [16] обладает наименьшим энергопотреблением (2,3 мВт/разряд). Стоит отметить, что в описанной реализации используется только один источник питания -3,3 В.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10036).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Темнов, А. М.** Комплект широкополосных СВЧ-микросхем на гетероструктурах $A^{III}B^{V}$ для ППМ АФАР *X*-диапазона / А. М. Темнов, К. В. Дудинов, В. А. Красник и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2010. – № 2 (505). – С. 30 – 49.

2. **Sim, S. A** compact *X*-band bi-directional phased-array T/R chipset in 0.13 um CMOS technology / S. Sim, L. Jeon, J.-G. Kim // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2013. – Vol. 61, No 1. – P. 562 – 569.

3. **Lorenzo, P.** Design of a Ka-band single-chip front-end based on a 100 nm GaN-on-Si technology / P. Lorenzo, C. Walter, L. Remy et al. // 2020 International Workshop on Integrated Non-linear Microwave and Millimetre-Wave Circuits (INMMiC). – 2020. – P. 1 – 3.

4. **Shaked, Z.** SOI technology for front end applications / Z. Shaked, P. Hurwitz, A. Heiman // 2015 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS). – 2015. – P. 1 – 3.

5. **Burrier, R. A.** Monolithic GaAs programmable parallel-to-serial and serial-to-parallel converters / R. A. Burrier, H. P. Singh, R. A. Sadler et al. // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. – 1990. – Vol. 1. – P. 587 – 590.

6. **Аржанов, С. Н.** СВЧ GaAs МИС дискретных фазовращателей *C*-диапазона со встроенным драйвером управления / С. Н. Аржанов, В. А. Арыков, А. А. Баров и др. // 18-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – 2008. – С. 1 – 2.

7. **Van Wanum, M.** Generic robust LVCMOS-compatible control logic for GaAs HEMT switches / M. van Wanum, G. van der Bent, M. Rodenburg, A. P. de Hek // 2006 European Microwave Integrated Circuits Conference. – 2006. – P. 83 – 86.

8. **Chen, W.** Low power compact GaAs PHEMT level converter for digital control logics of GaAs switches / W. Chen, H. Luo, M. Zhou et al. // Information Technology Journal. – 2013. – Vol. 12, No 5. – P. 1030 – 1034.

9. **Bentini, A.** Design and realization of GaAs digital circuit for mixed signal MMIC implementation in AESA applications / A. Bentini, B. Pasciuto, W. Ciccognani et al. // International Journal of Microwave Science and Technology. – 2011. – Vol. 2011. – P. 1 – 11.

10. **Kim, D.** Compact 4-bit GaAs Ku-band core chips for phased arrays / D. Kim, K. Yeom // Microwave and Optical Technology Letters. – 2020. – Vol. 62, No 6. – P. 2289 – 2299.

11. **Lee, H.** A Ku-band GaAs multifunction transmitter and receiver chipset / H. Lee, Y. Kim, I. Lee et al. // Electronics. – 2020. – Vol. 9, No 8. – P. 1 – 16.

12. **Jiang, Y.** Design and realization of a 13-bit serial to paralel GaAs digital circuit for 6 – 18 GHz T/R module / Y. Jiang, X. Jiang, Y. Li, W. Hong, // 2016 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB). – 2016. – P. 1 – 3.

13. **Pirola, M.** 13-bit GaAs serial-to-parallel converter with compact layout for core-chip applications / M. Pirola, R. Quaglia, G. Ghione et al. // Microelectronics J. Elsevier. – 2014. – Vol. 45, No 7. – P. 864 – 869.

14. **Ghione, G.** Compact GaAs HEMT D flip-flop for the integration of a SAR MMIC core-chip digital control logic / G. Ghione, M. Pirola, R. Quaglia et al. // 2010 Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimeter-Wave Circuits. IEEE. – 2010. – P. 62 – 65.

15. **Zhou, S.** A 7.5 – 9 GHz GaAs two-channel multi-function chip / S. Zhou, J. Zhang et al. // Electronics. – 2019, – Vol. 8, No 4. – P. 1 – 9.

16. **Ramella, C.** Low power GaAs digital and analog functionalities for microwave signal conditioning in AESA systems / C. Ramella, P. Longhi, A. Nasri et al. // 2020 International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-Wave Circuits (INMMiC). – 2020. – P. 1 – 3.

17. **Foley, C.** Characterizing metastability / C. Foley // Proceedings Second International Symposium on Advanced Research in Asynchronous Circuits and Systems. – 1996. – P. 175 –184.

18. **Yanyang, X.** Direct coupled FET logic (DCFL) circuit for GaAs LSIC application / X. Yanyang, Z. Xiaoguang, H. Jingchen // ICMMT'98. 1998 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. – 1998. – P. 913 – 916.

19. **Shur, M.** GaAs devices and circuits / M. Shur. – NY.: Springer. – 1987. – 670 p.

20. **Busheri, E.** Critical design issues for GaAs VLSI circuit / E. Busheri. – London: Middlesex Polytechnic University, 1992. – 80 p.

21. **Deming, R. N.** A gallium arsenide configurable cell array using buffered FET logic / R. N. Deming, R. Zucca, R. Vahrenkamp et al. // IEEE J. Solid-State Circuits. – 1984. – Vol. 19, No 5. – P. 728 – 738.

22. **Harris, M.** A 12-bit serial-to-parallel converter using depletion-mode-only devices / M. Harris // 2017 Texas Symposium on Wireless and Microwave Circuits and Systems. – 2017. – P. 1 – 4.

23. **Vu, T.** A gallium arsenide SDFL gate array with on-chip RAM / T. Vu, P. Roberts, R. Nelson et al. // IEEE Trans. Electron Devices. – 1984. – Vol. 31, No 2. – P. 144 – 156.

24. **Kanan, R.** A low-power GaAs flip-flop / R. Kanan, B. Hochet, F. Kaess, M. Declerq // 5th European Gallium Arsenide and Related III-V Compounds Applications Symposium. – 1997. – P. 251 – 254.

25. **Kanan, R.** PCFL3: A low-power high speed single-ended logic family / R. Kanan, F. Kaess, M. Declercq // GaAs IC Symposium. IEEE Gallium Arsenide Integrated Circuit Symposium. 20th Annual. – 1998. – P. 63 – 67.

26. **Кочемасов, В.** Аттенюаторы с электронным управлением – производители и характеристики / В. Кочемасов, Л. Белов // СВЧ-электроника. – 2017. – № 4. – С. 82 – 95.

27. **Ramella, C.** Ultralow-power digital control and signal conditioning in GaAs MMIC core chip for *X*-band AESA Systems / C. Ramella, E. L. Patrick, P. Lorenzo et al. // IEEE Transsections on Microwave Theory Techiques. – 2021. – P. 1 – 13.

28. AT-283-PIN: Digital Attenuator 15,5 dB, 5-bit, TTL Driver, DC-2,0 GHz. MACOM Technology Solutions. Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cdn.macom.com/datasheets/AT-283-PIN.pdf.

29. AA106-86, AA106-86LF: GaAs IC 5-Bit Digital Attenuator 0,5 dB LSB Positive Control 0,5 2,0 GHz Skywork Solutions, Inc. Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://store.skyworksinc.com/products/detail/aa10686-skyworks-solutions-inc/16868.

30. **Weigand, C.** An ASIC driver for GaAs FET control components / C. Weigand // Applied Microwave and Wireless. – 2000. – Vol. 12, No 2. – P. 42 – 48.

31. **De Boer, A.** GaAs mixed signal multi-function X-band MMIC with 7 bit phase and amplitude control and integrated serial to parallel converter / A. de Boer, K. Mouthaan // 2000 30th European Microwave Conference. – 2000. – P. 1 – 4.

32. MAMFGM0001-DIE: Control Chip, X-Band T/R 7,0 – 12,0 GHz. MACOM Technology Solutions. Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://datasheet.datasheetarchive.com/originals/distributors/Datasheets-17/DSA-326073.pdf (дата обращения 29.11.2020).

33. CGY2170UH: 7-bit X-Band Core Chip. OMMIC. Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://oessp.ru/upload/iblock/2d2/2d2d203c31b9efdc6e5f2037868712de.pdf (дата обращения 29.11.2020).

34. XZ1002-BD: 8,5 – 11,0 GHz GaAs MMIC Core Chip. MACOM Technology Solutions. Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://datasheet.datasheetarchive.com/originals/library/Datasheets-IS23/DSA00455280.pdf (дата обращения 29.11.2020).

35. CGY2170XUH/C2: 6-bit X-Band Core Chip. OMMIC. Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ommic.com/datasheets/OMMIC_DATASHEET_CORECHIP_CGY2170XUH-C2.pdf (дата обращения 29.11.2020).

36. MP001D: X-band GaAs MMIC Core Chip. Micran. Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: download.micran.ru/kia/catalog/C_СВЧ-микроэлектроника_RU_1 03_WEB.pdf (дата обращения 06.05.2021).

37. **Jeong, J.-C.** An S-band multifunction chip with a simple interface for active phased array base station antennas / J.-C. Jeong // ETRI J. – 2013. – Vol. 35, No 3. – P. 378 – 385.

38. **Jeong, J.-C.** A 6 – 18-GHz GaAs Multifunction Chip With 8-bit True Time Delay and 7-bit Amplitude Control / J.-C. Jeong, I. B. Yom, J. D. Kim et al. // IEEE Transsections on Microwave Theory Techiques. – 2018. – Vol. 66, No 5. – P. 2220 – 2230.

39. **Lee, C.-D.** Design of a serial-to-parallel converter using GaAs pHEMT / C. D. Lee, D. Lee, K. Yeom // J. Korean Inst. Electromagn. Eng. Sci. – 2018. – Vol. 29, No 3. – P. 171 – 183.

40. **Stesev, G.** Serial-to-parallel converter using GaAs D-mode transistors / G. Stesev, D. Budanov, E. Balashov // 2020 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics. – 2020. – P. 67 – 70.

41. **Курикалов, В. В.** Цифровые драйверы управления на основе GaAs. / В. В. Курикалов, Е. В. Сапожников, Д. С. Хохол // 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». – 2019. – С. 365 – 367.

Статья поступила 22 июня 2021 г.,
после переработки – 1 августа 2021 г.

НОВЫЕ КНИГИ

ГРИГОРЬЕВ А. Д. **Терагерцовая электроника.** – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2021. – 308 с.

В книге рассматриваются свойства электромагнитных колебаний и волн терагерцового диапазона, особенности их взаимодействия с веществом и причины образования так называемого «терагерцового провала». Изложены принципы действия, элементы теории, конструкции и параметры источников и детекторов терагерцового излучения, основанных как на квантовых эффектах, так и на процессах транспорта носителей заряда в различных средах. Рассматриваются лазеры терагерцового диапазона, источники и детекторы, основанные на фотопроводимости; полупроводниковые, сверхпроводящие и вакуумные источники и детекторы. Подробно описаны проблемы продвижения «классических» микроволновых электровакуумных приборов в терагерцовый диапазон.

Автор надеется, что книга будет полезна разработчикам приборов и аппаратуры терагерцового и микроволнового диапазонов, аспирантам и студентам, изучающим микроволновую электронику, а также ученым и инженерам, использующим терагерцовое излучение в своей деятельности.

МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.372.8

ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИИ КЛЕТОК КРОВИ НА МИКРОВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

К. Д. Казаринов

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино

В связи с развитием телекоммуникаций в рамках новой платформы 5*G* и увеличением плотности расположения передающих антенн в районах жилой застройки в ближайшие годы повышается опасность интенсивного облучения населения микроволнами и, следовательно, ставится задача по дополнительной защите здоровья людей. Результаты экспериментальных исследований, полученных автором данной статьи с коллегами, предлагают принять во внимание наличие дополнительных физико-химических факторов, присутствующих в окружающей среде, при выработке стратегии установления допустимых уровней воздействия микроволновых электромагнитных полей на человека. Учитывая значительное количество литературных данных по данному вопросу, относящихся к широкому диапазону микроволнового излучения, можно считать предлагаемый подход оправданным.

КС: микроволновое излучение, окислительный стресс, активные формы кислорода, совместное действие микроволнового излучения и других физико-химических факторов, прайминг

FEATURES OF THE BLOOD CELL'S REACTION TO MICROWAVE RADIATION

K. D. Kazarinov

FIRE named after V.A. Kotelnikov RAS, Fryazino

In connection with the development of telecommunications within the framework of the new 5G platform and an increase in the density of the location of transmitting antennas in residential areas in the coming years, the danger of intense exposure of the population to microwaves is increasing and, therefore, the task is set to additional protection of human health. The results of experimental studies, obtained by the author of this article and colleagues, suggest taking into account the presence of additional physicochemical factors, present in the environment, when developing a strategy of establishing permissible levels of exposing humans to microwave electromagnetic fields. Considering the significant amount of reference data on this issue, related to a wide range of microwave radiation, the proposed approach can be considered justified.

Keywords: microwaves, oxidative stress, reactive oxygen species, combined action of microwave radiation and other physicochemical factors, priming

1. ВВЕДЕНИЕ

Современный мир стоит на пороге вступления в новую технологическую фазу развития телекоммуникаций – обретения сети 5*G*, которая позволит значительно повысить скорость передачи данных, в том числе и на движущихся с высокой скоростью объектах, управления удаленными

процессами и крупными производствами. Сложность нового стандарта заключается в больших потерях несущего излучения микроволнового диапазона на преодоление стен зданий и атмосферных осадков. Обойти подобные сложности позволит система из множества миниатюрных ретрансляторов от базовых станций, которые, скорее всего, будут размещаться на существующих уличных сооружениях. Возникшая ситуация ставит вопрос о дополнительных мерах по защите здоровья населения, и особенно специалистов, занятых в производстве и внедрении этой техники. Хотя стандартизованные уровни воздействия микроволновых электромагнитных полей (ЭМП) не должны превышать допустимых пределов, принятых в мире, реальное воздействие на здоровье новых коммуникационных технологий активно обсуждается общественностью [1]. Анализ известных литературных данных подтвердил способность микроволнового излучения вызывать окислительный стресс в организме человека за счет увеличения продукции активных форм кислорода [2–3]. При этом необходимо отметить, что биологические эффекты были также зарегистрированы при уровнях воздействия ниже нормативных пределов, что вызывает дополнительные опасения и растущие сомнения людей в безопасности применяемых стандартов [4–5].

К этому следует добавить, что пагубное воздействие микроволнового излучения может усиливаться при совместном влиянии его с токсическими веществами и другими излучениями антропогенной среды. Рассмотрению вопроса совместного действия микроволнового излучения и других факторов физико-химической природы на клетки крови и посвящена данная работа.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Опыт работы в области изучения биологического действия микроволнового излучения, а также анализ экспериментальных результатов других исследователей показывают, что во многих случаях данное излучение в широком диапазоне длин волн само по себе может не влиять на клетки крови, но значительно усиливает реакцию клеток на активатор. Исследования *in vitro* мононуклеарных клеток периферической крови, подвергнутых воздействию микроволнового излучения СВЧ-диапазона, не выявили статистически значимых изменений параметров функциональной активности лимфоцитов, моноцитов и других иммунных клеток, измеренных после воздействия [6–7]. Тем не менее, иммунная активность лимфоцитов и моноцитов при облучении микроволнами частотой 900 МГц значительно возрастала при добавлении в среду инкубации активатора. В данном эксперименте было показано, что дециметровое излучение усиливает активацию нейтрофилов только в том случае, если клетки были инкубированы в среде с низкими концентрациями миристатацетата [8].

В работе [9] выявлен высокий синергический эффект воздействия микроволнового излучения КВЧ-диапазона, а также физических и химических биоцидных факторов. Источником УФ-излучения служил облучатель ОУФК 01. Эффективный спектральный диапазон – 230…400 нм в дозе 60 мДж/см. В качестве химических факторов использовались дезинфицирующие средства. По итогам проведенных исследований авторы работы сделали вывод о том, что КВЧ-излучение нарушает внутриклеточные механизмы нейтрализации мутагенных эффектов УФ-излучения, и рекомендуют проводить данное комплексное воздействие в плане антиплесневых дезинфекционных мероприятий с высоким уровнем эффективности. Эффект совместного действия КВЧ, УФ и химических факторов достигается, по мнению авторов, тем, что один фактор воздействует непосредственно на морфологию, физиологические и биохимические процессы у грибов, а другой (КВЧ-облучение) – облегчает его проникновение в клетки. На справедли-

вость данной гипотезы указывают результаты наших экспериментов, которые показали, что действие КВЧ-излучения на биологические объекты может быть связано с усилением конвекции водных растворов и пассивного транспорта ионов через мембраны [10].

Добавление наночастиц серебра к водному раствору сывороточного альбумина на фоне влияния переменного магнитного поля приводило к многократному увеличению интенсивности флуоресценции белка [11]. Механизм наблюдаемого синергического эффекта авторы видят в наличии плазмонных колебаний электронного газа наночастиц серебра, что изменяет эффективность взаимодействия близлежащих молекул сывороточного альбумина с внешним переменным магнитным полем.

Исследования влияния КВЧ-излучения на нейтрофилы были выполнены для изолированных мышечных перитонеальных нейтрофилов (МПН) при низких интенсивностях излучения (<150 мкВт/кг). Метод измерения хемилюминесценции (ХЛ) применяли для обнаружения продукции активных форм кислорода (АФК) активированными нейтрофилами. Было показано, что облучение (41,8…42,05 ГГц) ингибирует продукцию АФК нейтрофилами, активированными опсонизированным зимозаном (ОЗ) в зоне ближнего поля КВЧ-излучателя [12]. Напротив, Сафронова с сотрудниками продемонстрировали увеличение *N*-формил-метионил-лейцил-фенилаланин (fMLP) – ответа праймированных (но не интактных) клеток при воздействии КВЧ низкой интенсивности частотой 42,2 ГГц [13].

Проведенные исследования [14] показали, что сочетанное действие ЭМИ КВЧ частотой 37 ГГц и плотностью мощности менее 0,1 мВт/см^2 с гентамицином на млекопитающих вызывает изменения гистологической структуры тканей почек, которые формируются уже на первой неделе воздействия.

В наших экспериментах изучалось влияние микроволн с длиной волны 7,7 мм (37 ГГц) на активацию нейтрофилов. Для характеристики продукции свободных радикалов и оксидантов активированными нейтрофилами мы выбрали метод люминол-зависимой ХЛ, который позволяет оценивать степень активации нейтрофилов немедленно после прекращения облучения образца крови. Для активации нейтрофилов к образцам цельной крови добавляли ОЗ (0,6 мг/мл) или лабораторный штамм *E. coli* (25 или 50 млн клеток в 1 мл), после чего сравнивали активность нейтрофилов в контрольных пробах крови и образцах, подвергшихся воздействию микроволнового облучения в течение 5, 15 и 30 мин. По окончании инкубации брали пробы для измерения кинетики люминол-зависимой ХЛ крови. Кинетику люминол-зависимой ХЛ измеряли после добавления крови в раствор Кребса Рингера, содержащий 300 мкМ люминола. В четырех независимых экспериментах было показано, что радикал-генерирующая активность нейтрофилов выше на 20…30 % в пробах крови, которые были подвергнуты облучению в течение 15 мин. В то же время КВЧ не вызывало активации нейтрофилов в крови, не содержащей индуктор активации нейтрофилов. Наши эксперименты показали, что излучение длиной волны 7,7 мм усиливает радикально-генерирующую способность активированных нейтрофилов, когда агонист добавляли к крови до облучения [15].

Чтобы выяснить источник повышенной продукции АФК в крови при КВЧ-воздействии, мы провели исследование влияния КВЧ-излучения на изолированные нейтрофилы и на функциональную активность МПО – основного фермента, секретируемого нейтрофилами в местах воспаления. КВЧ-воздействие на неочищенные изолированные нейтрофилы в плазме крови не вызывало активации клеток. Если в суспензию нейтрофилов добавляли агонист, КВЧ-излучение усиливало генерацию АФК клетками, о чем свидетельствует повышенный уровень люминол-

зависимой ХЛ. Облучение плазмы, содержащей МПО и глюкозооксидазу (в качестве источника H_2O_2), привело к небольшому (10…15 %), но статистически значимому увеличению окислительной активности МПО [15]. Как было показано ранее, воздействие на растворы белка КВЧ-излучения может вызвать изменения в структуре и функциях фермента и повысить активность пероксидаз. Результаты были получены измерениями кинетики концентрации ферментов, спектроскопией кругового дихроизма и циклической вольтамперометрией [16]. Таким образом, и в данном случае КВЧ-воздействие вызывало активацию нейтрофилов в плазме крови только в присутствии химического или бактериального индуктора.

Для выяснения механизма наблюдаемого явления следует обратиться к работам академика Ю. А. Владимирова и профессора Г. И. Клебанова, в которых изучались лейкоциты, обеспечивающие наиболее быстрые реакции организма на повреждающее действие и находящиеся в организме в покоящемся, промежуточном и активированном состоянии [17]. Увеличение функционального потенциала лейкоцитов в процессе предварительного воздействия получило название прайминга (priming), т. е. подготовки перевода клеток в рабочее состояние. Агенты различной природы могут оказывать как праймирующее, так и активирующее действие на клетки крови. Предлагается механизм прайминга, основанный на Ca^{2+}-зависимых внутриклеточных реакциях, приводящих к наработке мембраносвязанных комплексов НАДФН-оксидазы, которые находятся в потенциально активном состоянии, и экспрессии рецепторного аппарата. При последующей за праймингом стимуляции фагоциты отвечают большей продукцией различных прооксидантов, цитокинов и более выраженными другими функциональными проявлениями. Приводятся примеры формирования прайминга фагоцитов в результате перекисной сенсибилизированной модификации клеточных мембран, приводящей к увеличению проницаемости для ионов Ca^{2+}. Образование супероксидных радикалов с одновременным поглощением кислорода, или дыхательный взрыв, может быть стимулировано действием физических или химических веществ – переносчиков ионов кальция, опсонизированного зимозана и т. д. [18].

В то же время недостаточно изучена праймирующая функция КВЧ-излучения [19]. Сложилось ложное мнение о том, что микроволновое излучение в КВЧ-диапазоне оказывает влияние только на организм с измененным функциональным состоянием, а интактные животные и здоровые люди не восприимчивы к этому виду излучения. В противовес этому утверждению автор показывает, что многократное КВЧ-облучение низкой интенсивности здоровых животных может влиять на увеличение функционального статуса интактных клеток крови. Увеличение показателей содержания исследованных ферментов в нейтрофилах и лимфоцитах крыс при превентивном действии микроволн следует расценивать как повышение функционального потенциала лейкоцитов, т. е. наблюдался эффект прайминга (предварительного действия), что, несомненно, способствует повышению уровня физиологической защиты и резистентности организма к последующему активирующему действию гипокинезии и антигена.

Таким образом, превентивное праймирующее действие микроволнового излучения может приводить к увеличению потенциальной эффективности нейтрофилов и лимфоцитов, что способствует повышению резистентности организма к последующему действию повреждающих агентов [19].

Известно действие КВЧ-облучения на процесс апоптоза клеток крови [20]. Фагоцитарная элиминация (устранение) клеток, подвергающихся апоптозу (программируемой смерти), является врожденным иммунным механизмом для устранения ненужных клеток. Исследования показали увеличение уровня рецепторов поглощения в фагоцитах после фагоцитоза апоп-

тотических клеток, что приводит к повышению их фагоцитарной активности. Было обнаружено, что предварительная инкубация (прайминг) фагоцитов дрозофилы с фрагментами апоптотических клеток усиливала последующий фагоцитоз этих клеток. Авторы работы [21] предложили следующий механизм активации фагоцитов дрозофилы после взаимодействия с апоптотическими клетками. На первом этапе инициируются пути передачи сигнала для фагоцитоза, затем активируется репрессор транскрипции и, наконец, стимулируется экспрессия рецепторов поглощения, что повышает фагоцитарную активность. Следовательно, можно предположить, что КВЧ-излучение, стимулируя апоптоз клеток, увеличивает концентрацию фрагментов апоптотических клеток в крови и усиливает тем самым последующий их фагоцитоз [21].

В нашей работе [22] изучалось влияние микроволнового излучения в диапазоне КВЧ на скорость накопления продуктов перекисного окисления ненасыщенных жирных кислот, входящих в состав молекул фосфолипидов. Использовались различные способы инициирования перекисного окисления липидов (ПОЛ): УФ-облучение, добавление железоаскорбатной смеси, автоокисление, фотоокисление. Скорость ПОЛ в нашей работе регистрировалась с помощью реакций с 2-тиобарбитуровой кислотой (ТБК) и УФ-спектроскопии, а также за счет регистрации сверхслабого свечения (хемилюминесценции) с помощью разработанного, сконструированного и изготовленного в нашей лаборатории прибора – хемилюминометра на основе фотоумножителя ФЭУ-100 с областью спектральной чувствительности 170…830 нм, один из вариантов которого представлен в работе [23]. Во всех наших опытах микроволновое облучение приводило к ускорению процессов ПОЛ. Все три способа инициирования ПОЛ оказались достаточно эффективны, и уже через 15 мин протекания железоаскорбатного или фотохимического окисления концентрация продуктов возрастала в несколько раз. Эффект микроволнового излучения проявлялся при всех трех способах инициирования ПОЛ, и величина его достигала 20 %. Следует обратить внимание на то, что увеличение содержания продуктов ПОЛ в образцах, облучаемых микроволнами, отчетливо наблюдалось уже при плотностях падающей мощности (ППМ) падающего на объект излучения, не превышающих 1 мВт/см^2. При ППМ меньше 0,2 мВт/см^2 ускорения биохимических реакций выявить не удавалось. Следует также отметить, что эффект КВЧ-излучения наблюдался при всех исследованных длинах волн (8,5…4,0 мм). В данном случае измерялась концентрация гидроперекисей в суспензии липосом, которую разводили в буферном растворе в соотношении 1:3, и регистрировали величину «быстрой вспышки» ХЛ после введения избытка ферроионов (10^{-3} М) при интенсивном перемешивании. При данном способе измерения амплитуда «быстрой вспышки» пропорциональна квадрату концентрации гидроперекисей ненасыщенных жирных кислот, содержащихся в образце [22]. Таким образом, и в данной серии наших экспериментов была показана эффективность совместного воздействия микроволн и других физико-химических факторов на модельный биологический объект.

Работа выполнена в рамках госзадания ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вышеизложенные данные экспериментальных исследований показывают необходимость учитывать возможное усиление биологических эффектов микроволнового излучения на фоне действия неучтенных дополнительных физико-химических факторов, присутствующих в системе. Ситуация может оказаться угрожающей для здоровья людей в условиях ввода нового

стандарта телекоммуникаций, даже если стандартизованные уровни воздействия микроволновых ЭМП не будут превышать допустимых пределов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Sagar, S.** Radiofrequency electromagnetic field exposure in everyday microenvironments in Europe: a systematic literature review / S. Sagar, S. Dongus, A. Schoeni et al. // Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology. – 2017. – 28(2).

2. **Kazemi, E.** Effect of 900 MHz electromagnetic radiation on the induction of ROS in human peripheral blood mononuclear cells / E. Kazemi, S. M. Mortazavi, A. Ali-Ghanbari et al. // Journal of Biomedical Physics & Engineering. – 2015. – Vol. 5, No 3. – P. 105 – 114.

3. **Chauhan, P.** Microwave radiation (2.45 GHz)-induced oxidative stress: Whole-body exposure effect on histopathology of Wistar rats / P. Chauhan, H. N. Verma, R. Sisodia, K. K. Kesari // Electromagnetic Biology and Medicine. – 2017. – Vol. 36, No 16. – P. 20 – 30.

4. **Starkey, S. J.** Inaccurate official assessment of radiofrequency safety by the advisory group on non-ionising radiation / S. J. Starkey // Reviews on Environmental Health. – 2016. – Vol. 31, No 4. – P. 493 – 503.

5. **Redmayne, M.** International policy and advisory response regarding children's exposure to radio frequency electromagnetic fields (RF-EMF) / M. Redmayne // Electromagnetic Biology and Medicine. – 2016. – Vol. 35, No 2. – P. 176 – 185.

6. **Tuschl, H.** In vitro effects of GSM modulated radiofrequency fields on human immune cells / H. Tuschl, W. Novak, H. Molla-Djafari // Bioelectromagnetics. – 2006. – Vol. 27, No 3. – P. 188 – 196.

7. **Lantow, M.** ROS release and Hsp70 expression after exposure to 1,800 MHz radiofrequency electromagnetic fields in primary human monocytes and lymphocytes / M. Lantow, M. Lupke, J. Frahm, M. O. Mattsson, N. Kuster, M. Simko // Radiation Environmental Biophysics. – 2006. – Vol. 45, No 1. – P. 55 – 62.

8. **Stankiewicz, W.** Immunotropic influence of 900 MHz microwave GSM signal on human blood immune cells activated in vitro / W. Stankiewicz, M. P. Dabrowski, R. Kubacki, E. Sobiczewska, S. Szmigielski // Electromagnetic Biology and Medicine. – 2006. – Vol. 25, No 1. – P. 45 – 51.

9. **Кряжев, Д. В.** Эффекты комбинированного действия низкоинтенсивного мм-излучения и высокоинтенсивных химических и физических фугницидных факторов / Д. В. Кряжев, А. А. Ичеткина, В. Ф. Смирнов // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2012. – № 2-3. – С. 64 – 69.

10. **Казаринов, К. Д.** Исследование мембранотропной активности ЭМИ в широком диапазоне длин волн / К. Д. Казаринов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2018. – Вып. 2 (537) . – С. 62 – 75.

11. **Текуцкая, Е. Е.** Влияние переменного магнитного поля и наночастиц серебра на спектральные характеристики водного раствора человеческого сывороточного альбумина / Е. Е. Текуцкая, М. Г. Барышев, Е. Н. Тумаев, Г. П. Ильченко // Биофизика. – 2020. – Т. 65, № 3. – С. 479 – 485.

12. **Gapeyev, A. B.** Inhibition of the production of reactive oxygen species in mouse peritoneal neutrophils by millimeter wave radiation in the near and far field zones of the radiator / A. B. Gapeyev, V. G. Safronova, N. K. Chemeris, E. E. Fesenko // Bioelectrochemistry Bioenergetics. – 1997. – Vol. 43, No 2. – P. 217 – 220.

13. **Safronova, V. G.** Immunomodulating action of low intensity millimeter waves on primed neutrophils / V. G. Safronova, A. G. Gabdoulkhakova, B. F. Santalov // Bioelectromagnetics. – 2002. – Vol. 23, No 8. – P. 599 – 606.

14. **Куротченко, Л. В.** Сочетанное воздействие КВЧ-облучения и нефротоксичных препаратов на млекопитающих / Л. В. Куротченко, Т. И. Субботина, О. В. Терешкина, Хадарцев, А. А. Яшин. – Москва –Тула – Тверь: ООО «Издательство «Триада», 2009. – 144 с.

15. **Vlasova, I. I.** Extremely high-frequency electromagnetic radiation enhances neutrophil response to particulate agonists / I. I. Vlasova, E. V. Mikhalchik, A. A. Gusev, N. G. Balabushevich, S. A. Gusev and K. D. Kazarinov // Bioelectromagnetics. – February 2018. – Vol. 39, Is. 2. – P. 144 – 155.

16. **Barteri, M.** Montemiglio LC. Effects of microwaves (900 MHz) on peroxidase systems: a comparison between lactoperoxidase and horseradish peroxidase / M. Barteri, R. De Carolis, F. Marinelli, G. Tomassetti // Electromagn. Biol. Med. – 2016. – Vol. 35. – P. 126 – 133.

17. **Клебанов, Г. И.** Клеточные механизмы прайминга и активации фагоцитов / Г. И. Клебанов, Ю. А. Владимиров // Успехи соврем. биол. – 1999. – Т. 119, № 5. – С. 462 – 475.

18. **Владимиров, Ю. А.** Фотобиология и экспериментальная фотомедицина / Ю. А. Владимиров, Т. В. Жидкова, Е. В. Проскурнина, Д. Ю. Измайлов. – 2012. – Т. 1, № 1. – С. 42 – 48.

19. **Верко, Н. П.** ЭМИ КВЧ вызывает прайминг лейкоцитов / Н. П. Верко // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Сер. Биология. – 2003. – Т. 16 (55), № 2. – С. 39 – 44.

20. **Казаринов, К. Д.** Влияние ЭМИ низкой интенсивности микроволнового диапазона на окислительные процессы в клетках / К. Д. Казаринов, Г. Г. Борисенко, И. Г. Полников // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2018. – Вып. 1 (536). – С. 60 – 68.

21. **Nonaka, S.** Signaling pathway for phagocyte priming upon encounter with apoptotic cells / S. Nonaka, Yu. Ando, T. Kanetani, Ch. Hoshi, Yu. Nakai, F. Nainu, K. Nagaosa, A. Shiratsuchi, Yo. Nakanishi // J. Biol. Chem. – May 2017. – Vol. 12, No 292(19). – P. 8059 – 8072.

22. **Казаринов, К. Д.** Воздействие электромагнитных полей микроволнового диапазона модифицирует сверхслабое свечение продуктов жизнедеятельности клеток / К. Д. Казаринов, А. В. Чеканов // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – № 3. – С. 1 – 29.

23. **Казаринов, К. Д.** Комплекс методов и приборов для изучения электромагнитной чувствительности биологических объектов / К. Д. Казаринов // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2020. – № 2. – С. 5 – 14.

Статья поступила 21 июня 2021 г.

НОВЫЕ КНИГИ

ГАВРИЛОВ К. Ю. **Моделирование и обработка радиолокационных сигналов в Matlab:** Учебное пособие / Гаврилов К. Ю., Каменский И. В., Кирдяшкин В. В., Линников О. Н.; Под ред. Гаврилова К. Ю. – М.: Радиотехника, 2020. – 264 с.

Рассмотрены методы моделирования радиоэлектронных сигналов при отражении от сложных целей, принципы моделирования аналоговых и цифровых устройств обработки сигналов, включающие формирование двумерной матрицы цифровых отсчетов, методы согласованной фильтрации, обнаружения и обработки сигналов в импульсно-доплеровских радиолокационных системах.

Показаны примеры обработки наиболее распространенных видов радиолокационных сигналов – импульсных, с линейной частотной модуляцией и фазо-кодоманипулированных сигналов. Приведены программы моделирования и обработки сигналов в среде Matlab.

Для студентов, аспирантов и инженеров, изучающих и использующих теорию радиолокации и методы моделирования и обработки радиолокационных сигналов. Будет полезно научным работникам и разработчикам радиолокационных систем.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 537.531

ОБ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ЗАРЯДОВ

И. П. Попов

Курганский государственный университет, г. Курган

Считается, что электрический заряд, движущийся по круговой траектории, т. е. с центростремительным ускорением, должен излучать фотоны. Цель работы состоит в установлении условий излучения электрического заряда, исходя из существенных отличий между его тангенциальным и центростремительным ускорениями. Исходным пунктом является достоверное утверждение. С ним выполняется ряд математически корректных преобразований. Следовательно, результат является необходимо достоверным. Из того обстоятельства, что электромагнитное излучение уносит энергию, следует, что энергия излучающей системы при излучении изменяется. С этим связано следующее общеизвестное правило: изменение энергии равно совершенной работе. Результаты исследования могут использоваться при построении теоретических моделей явлений и процессов, а также учитываться в технических приложениях.

КС: излучение, заряд, тангенциальное ускорение, нормальное ускорение, энергия, работа, фотон, спин

ABOUT THE EMISSIVITY OF CHARGES

I. P. Popov

Kurgan State University, Kurgan

It is believed that an electric charge moving along a circular path, i.e. with centripetal acceleration, must emit photons. The purpose of the work is to establish the conditions for the radiation of an electric charge, based on significant differences between its tangential and centripetal accelerations. The starting point is a credible statement. A number of mathematically correct transformations are performed with it. Therefore, the result is necessarily reliable. From the fact that electromagnetic radiation carries away energy, it follows that the energy of the radiating system changes during radiation. The following well-known rule is associated with this: the change in energy is equal to the work done. The research results can be used in the construction of theoretical models of phenomena and processes, as well as taken into account in technical applications.

Key words: radiation, charge, tangential acceleration, normal acceleration, energy, work, photon, spin

1. ВВЕДЕНИЕ

Считается, что электрический заряд, движущийся по круговой траектории, т. е. с центростремительным ускорением, должен излучать электромагнитные волны. Это распространяется в том числе на циклотронное излучение [1, 2].

Цель работы состоит в установлении условий излучения электрического заряда, исходя из существенных отличий между его тангенциальным и центростремительным ускорениями.

Актуальность работы определяется широким использованием устройств, генерирующих электромагнитное излучение за счет ускорения электрических зарядов, в том числе рентгеновских установок и магнетронов [3–6].

Методика. Исходным пунктом является ***достоверное*** утверждение. С ним выполняется ряд математически ***корректных*** преобразований. Следовательно, результат является ***необходимо достоверным.***

Печальный опыт показывает, что для многих специалистов эта логика недоступна. В случае, если такой ***необходимо достоверный*** результат противоречит существующей парадигме, предпочтение практически всегда отдается парадигме, не взирая на убедительность доказательств. Это обстоятельство является почти непреодолимым препятствием получения нового знания. Ведь если оно не противоречит парадигме, то оно не новое и ценности никакой не представляет.

Остается лишь надеяться, что в данном конкретном случае произойдет исключение из правил и ***необходимо достоверный*** результат будет признан таковым.

2. УСЛОВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ЗАРЯДА

Электромагнитное излучение уносит энергию.

Из этого следует, что энергия излучающей системы при излучении изменяется. С этим связано **правило** (общеизвестное): изменение энергии равно совершенной работе

$$dE = dA.$$

Работа:

$$dA = \mathbf{F}\cdot d\boldsymbol{s}.$$

Теорема 1. Тангенциально ускоренный заряд излучает электромагнитные волны.

Доказательство.

Пусть

$$\mathbf{F} = F\frac{\mathbf{s}}{s}.$$

Тогда

$$dA = \mathbf{F}\cdot d\mathbf{s} = F\frac{\mathbf{s}}{s}\cdot d\mathbf{s} = Fds = dE \neq 0.$$

Теорема доказана.

Теорема 2. Нормально ускоренный заряд не излучает электромагнитные волны.

Доказательство.

Пусть

$$\mathbf{F} = F\frac{\mathbf{r}}{r},\ \mathbf{r}\perp\mathbf{s}.$$

Тогда

$$dA = \mathbf{F}\cdot d\mathbf{s} = F\frac{\mathbf{r}}{r}\cdot d\mathbf{s} = 0.$$

Теорема доказана.

Теорема 2 формализует общеизвестное в механике обстоятельство, заключающееся в том, что центростремительная сила работы не совершает (поскольку скалярное произведение ортогональных векторов равно нулю).

3. О ДИНАМИКЕ ЗАРЯДА

Доказательства теорем 1 и 2 выполнены в терминах сил. Для инертных тел переход к терминам ускорений осуществляется в соответствии со вторым законом Ньютона.

Для электрических зарядов подобный переход возможен с учетом выражения

$$m_e = k\frac{e^2\mu_0}{b}, \tag{1}$$

где m_e – масса электрона; e – его заряд; μ_0 – магнитная постоянная; b – величина, имеющая размерность длины; k – безразмерный коэффициент [7].

Теорема 3. Электрический заряд удовлетворяет второму закону Ньютона.

Доказательство.

Пусть электрон движется в направлении **s** со скоростью $\mathbf{v} = v\mathbf{s} / s$.

Выражение (1), строго говоря, не предполагает какой-то конкретной геометрической формы электрона, при этом оно позволяет временно формально представить его в виде эквивалентной безмассовой заряженной сферы радиусом $k_1 b$. Здесь k_1 – коэффициент пропорциональности, который при дальнейшем рассмотрении определяется однозначно.

Энергия электростатического поля равномерно заряженной сферы радиусом $k_1 b$ и зарядом e определяется выражением:

$$W_\varepsilon = \frac{1}{2}\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 k_1 b}. \tag{2}$$

Поскольку заряженная сфера поступательно движется, имеет место магнитное поле, напряженность которого равна

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0 c^2}[\mathbf{v}, \mathbf{E}],$$

где **E** – напряженность электрического поля. Энергии электрического и магнитного полей соотносятся следующим образом:

$$dW_\varepsilon = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2}dV = \frac{E^2}{2c^2\mu_0}dV,$$

$$dW_\mu = \frac{\mu_0 H^2}{2}dV = \frac{\mu_0}{2}\left\{\frac{1}{\mu_0 c^2}[\mathbf{v}, \mathbf{E}]\right\}^2 dV = k_2\frac{E^2 v^2}{2\mu_0 c^4}dV = k_2 dW_\varepsilon \frac{v^2}{c^2},$$

где k_2 – коэффициент пропорциональности, обусловленный пространственной конфигурацией магнитного поля.

С учетом (2)

$$W_\mu = k_2 W_\varepsilon \frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{2}\frac{k_2 e^2 v^2}{4\pi\varepsilon_0 k_1 b c^2} = k\frac{e^2\mu_0 v^2}{2b}.$$

Соответствующим образом подбирая k_1, можно добиться равенства

$$k = \frac{k_2}{4\pi k_1}.$$

Сила является градиентом энергии:

$$\mathbf{F} = \frac{dW_{\mu}}{d\mathbf{r}} = k\frac{e^2\mu_0}{2b}\frac{d(v^2)}{d\mathbf{r}} = k\frac{e^2\mu_0}{b}\mathbf{v}\frac{d\mathbf{v}}{d\mathbf{r}} = k\frac{e^2\mu_0}{b}\mathbf{v}\frac{d\mathbf{v}/dt}{d\mathbf{r}/dt} = k\frac{e^2\mu_0}{b}\mathbf{v}\frac{1}{\mathbf{v}}\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = k\frac{e^2\mu_0}{b}\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}.$$

С учетом (1)

$$\mathbf{F} = m_e\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}.$$

Теорема доказана.

Теорема 3 позволяет перейти к терминам ускорений в теоремах 1 и 2.

4. О СПИНЕ ФОТОНА

При переходе водородоподобного атома из одного стационарного состояния в другое орбитальный момент импульса меняется. Разницу приписывают фотону и называют спином фотона [8].

Теорема 4. Спин фотона равен нулю.

Доказательство.

Дифференциал энергии вращательного движения для инерционного объекта в общем случае имеет вид:

$$dE = J\frac{d\omega}{dt}d\varphi = J\omega d\omega = Ld\omega.$$

Для безынерционного фотона дифференциальная форма записи не имеет смысла (поскольку для него $E(\omega)$ – негладкая функция), поэтому аналог предыдущего выражения для него имеет вид:

$$\Delta E = L_p\Delta\omega.$$

При этом $\Delta\omega = \omega$, $L_p = \hbar$.

Полная энергия фотона:

$$E = h\nu + \Delta E = h\nu + \hbar\omega = h\nu + 2\pi\hbar\frac{\omega}{2\pi} = h\nu + h\nu = 2h\nu,$$

т. е. в два раза больше энергии, выделяемой атомом при излучении, что противоречит закону сохранения энергии. Из этого следует, что $\Delta E = 0$.

Теорема доказана.

Замечание. Дефект момента импульса атома при излучении без труда можно приписать ядру атома и даже электрону. В последнем случае переориентация спина электрона как раз равняется $\hbar$ ($\hbar/2 - (-\hbar/2) = \hbar$) [9].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Считается, что магнетронное излучение происходит в результате нормального ускорения зарядов, а фотоны имеют спин.

Это и есть парадигмы, о которых шла речь в методике. Эти парадигмы противоречат ***необходимо достоверным*** результатам – теоремам 2 и 4. Следовательно, они (парадигмы) недостоверны. В этом нет ничего плохого и даже странного. История науки говорит о том, что ***все*** *научные парадигмы являются недостоверными.*

В свете теорем 1 и 2 причину магнетронного излучения следует искать в тангенциальном ускорении, обусловленном кулоновскими взаимодействиями зарядов пучка.

Никто не сомневался, что тангенциальное ускорение электрического заряда приводит к излучению электромагнитных волн. Вот только укоренившееся обобщение феномена излучения на ускорение «вообще», в т.ч. нормальное ускорение заряда, неправомерно.

Парадоксальность ситуации состоит в том, что теоремы 1 и 2 не выглядят сенсационными.

Результаты исследования могут использоваться при построении теоретических моделей явлений и процессов, а также учитываться в технических приложениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Быковский, С. В.** Циклотронные защитные устройства: время восстановления параметров / С. В. Быковский, Ю. А. Будзинский, В. Г. Калина, В. Е. Котов, С. В. Николаев, О. А. Саврухин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – № 1 (544). – С. 12 – 21.

2. **Жабин, Г. А.** Эмиссионные характеристики молекулярно-напыленных оксидных катодов в циклотронных защитных устройствах / Г. А. Жабин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – № 2 (533). – С. 49 – 53.

3. **Фурсаев, М. А.** Частотная зависимость сопротивления резонаторной системы магнетрона и ее влияние на его работу в режиме синхронизации / М. А. Фурсаев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2019. – № 2 (541). – С. 39 – 43.

4. **Каргин, А. Н.** Аналитическая тепловая модель оксидного катода магнетрона / А. Н. Каргин, А. М. Соколов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2019. – № 2 (541). – С. 44 – 50.

5. **Фурсаев, М. А.** Зависимость параметров магнетрона в режиме срыва генерации от параметров нагрузки / М.А. Фурсаев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2018. – № 3 (538). – С. 59 – 63.

6. **Васильев, В. И.** Резонатор магнетронного типа: исследование асимметричности модуля коэффициента передачи по мощности с помощью моделирования / В. И. Васильев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – № 2 (529). – С. 22 – 31.

7. **Попов, И. П.** Сведение постоянной Планка к классическим фундаментальным константам / И. П. Попов // Вестник Удмуртского университета. Физика и химия. – 2014. – Вып. 3. – С. 51 – 54.

8. **Балыко, А. К.** Уравнение фотоэффекта / А. К. Балыко // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – № 4 (531). – С. 85 – 93.

9. **Попов, И. П.** Размер электрона с учетом спина / И. П. Попов // Инженерная физика. – 2016. – № 9. – С. 45 – 46.

Статья поступила 31 мая 2021 г.

УДК 51

СВОЙСТВА ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДРОБЕЙ

Часть 2

А. К. Балыко, Е. В. Терешкин, И. А. Балыко

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Описаны удивительные свойства периодических дробей, в том числе и полезные в технике.

КС: простые числа, периодические дроби, длина периода

PROPERTIES OF RECURRENT FRACTIONS

Part 2

A. K. Balyko, E. V. Tereshkin, I. A. Balyko

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

The amazing properties of recurrent fractions, including those useful in technology, are described.

Keywords: prime numbers, recurrent fractions, period length

В предыдущих работах [1, 2] мы рассмотрели малоизвестные свойства простых чисел и периодических дробей. В настоящей статье мы продолжим развивать тему и расскажем о новых результатах.

Периодические дроби получаются от деления 1 на простое число p.

1. Простые числа 2 и 5 не имеют периода, остальные простые числа имеют период $1/p = 0,(a_1a_2\ldots a_L)$, где период – цифры в скобках. Длину периода обозначают $L(p)$. Для $p = 7$ дробь $1/7 = 0,(142857)$; период равен 142857, $L(7) = 6$. Длина периода может принимать различные значения. При этом для некоторых больших простых чисел длина периода может быть и небольшой. Например, $L(239) = 7$, $L(271) = 5$. Примерно для половины простых чисел $L = p - 1$. К. Гаусс доказал, что $L = (p - 1)/q$, где q – целочисленный коэффициент. На основании изложенного можно сформулировать по меньшей мере две важные задачи.

А. Можно ли доказать или опровергнуть, что длины периодов периодических дробей составляют натуральный ряд чисел?

Б. Можно ли по виду простого числа p или по минимальному числу первых цифр периодической дроби определить коэффициент q? Решение этой задачи, на наш взгляд, может быть связано с теорией Галуа[1].

2. Для определения суммы квадратов периодических дробей $S_1 = \frac{1}{2^2} + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{5^2} + \frac{1}{7^2} + \ldots$ воспользуемся формулой Эйлера для целых s, полученной им в 1770 г. [3]:

[1]Галуа Эварист (1811 – 1830) – французский школьник, доказавший, как, не решая алгебраического уравнения произвольной степени, а только по его виду, используя теорию перестановок, определить имеет ли оно решение в действительных числах.

$$\prod_{j=1}^{\infty}\frac{1}{\left(1-\frac{1}{p_j^s}\right)}=\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{k^s}=\varsigma(s), \tag{1}$$

где ς(s) – дзета-функция, введенная Риманом в 1850 г. для произвольных, в том числе и комплексных, *s*.

Для целых четных *s* получены аналитические выражения [4]:

$$\varsigma(2)=\pi^2/6;\ \varsigma(4)=\pi^4/90;\ \varsigma(6)=\pi^6/945;\ \varsigma(8)=\pi^8/9450\ldots \tag{2}$$

Для целых нечетных *s* найдены числовые значения [4]:

$$\varsigma(3)=1{,}2020569\ldots;\ \varsigma(5)=1{,}0369277\ldots;\ \varsigma(7)=1{,}0083492\ldots \tag{3}$$

Обозначим сумму $F(s)=\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{p_k^s};$ поскольку $p_k>2$, то с ростом *s* функция *F*(*s*) уменьшается.

Возьмем логарифм от правой и левой частей уравнения (1), затем разложим левую часть в ряд Тейлора, в результате получим функциональное уравнение

$$F(s)+\frac{1}{2}\cdot F(2\cdot s)+\frac{1}{3}\cdot F(3\cdot s)+\ldots+\frac{1}{n}\cdot F(n\cdot s)+\ldots=\ln\varsigma(s). \tag{4}$$

Записывая уравнение (4) для *s* = 2, 3, 4… и отбрасывая высшие члены из-за малости *F*(*s*), приходим к системе уравнений:

$$\begin{gathered}F(2)+\frac{1}{2}\cdot F(4)+\frac{1}{3}\cdot F(6)+\frac{1}{4}\cdot F(8)+\frac{1}{5}\cdot F(10)+\frac{1}{6}\cdot F(12)+\frac{1}{7}\cdot F(14)\ldots=\ln\varsigma(2),\\ F(4)+\frac{1}{2}\cdot F(8)+\frac{1}{3}\cdot F(12)+\ldots=\ln\varsigma(4),\\ F(6)+\frac{1}{2}\cdot F(12)+\ldots=\ln\varsigma(6),\\ F(8)=\ln\varsigma(8)\ldots\end{gathered} \tag{5}$$

Разрешая систему относительно *F*(2) и используя формулы (2), найдем приближенное равенство

$$F(2)=\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{p_k^2}\approx\ln\frac{\varsigma(2)\cdot\sqrt[6]{\varsigma(12)}}{\sqrt{\varsigma(4)}\cdot\sqrt[3]{\varsigma(6)}\cdot\sqrt[5]{\varsigma(10)}\cdot\sqrt[7]{\varsigma(14)}}\approx\ln\frac{\pi}{2}. \tag{6}$$

3. Для натурального ряда сумма обратных величин произведений двух последовательных чисел находится просто

$$\sum_{k=2}^{\infty}\frac{1}{k\cdot(k+1)}=\frac{1}{2\cdot3}+\frac{1}{3\cdot4}+\frac{1}{4\cdot5}\ldots=\frac{1}{2}-\frac{1}{3}+\frac{1}{3}-\frac{1}{4}+\frac{1}{4}-\frac{1}{5}\ldots=\frac{1}{2}=0{,}5.$$

Подобную сумму, составленную из простых чисел, вычислить гораздо сложнее, поскольку расстояние между двумя простыми числами изменяется от 2 (для чисел-близнецов) до очень больших чисел, причем случайным образом. Поскольку произведение двух попарных соседних периодических дробей с ростом величин простых чисел убывает, то и такой ряд будет сходиться к конечной десятичной дроби. Однако доказать это сложнее.

Обозначим k-е простое число через p_k ($p_1 = 2$, $p_2 = 3$, $p_3 = 5$, $p_4 = 7$, $p_5 = 11$, $p_6 = 13$ и т. д.). Сумма первых членов ряда из попарных произведений соседних периодических дробей в натуральном ряду с $N = 100$ (число простых чисел $n = 24$) равна

$$S(100) = \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{p_j \cdot p_{j+1}} = \frac{1}{2\cdot 3} + \frac{1}{3\cdot 5} + \frac{1}{5\cdot 7} + \frac{1}{7\cdot 11} + \ldots + \frac{1}{83\cdot 89} + \frac{1}{89\cdot 97} + \frac{1}{97\cdot 101} = 0,299324629\ldots$$

При увеличении N эта сумма возрастает (табл. 1): $\Delta(N) = S(N) - S(100)$.

Таблица 1

N	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
n	24	45	62	78	95	109	125	139	139	153
$S(N)$	0,2993246	0,3004321	0,3006832	0,3008037	0,3008875	0,3009329	0,3009711	0,3010034	0,3010247	0,3010401
$\Delta(N)$	0	$1{,}1075\cdot10^{-3}$	$0{,}2511\cdot10^{-3}$	$0{,}1205\cdot10^{-3}$	$0{,}0838\cdot10^{-3}$	$0{,}0453\cdot10^{-3}$	$0{,}0383\cdot10^{-3}$	$0{,}0322\cdot10^{-3}$	$0{,}0213\cdot10^{-3}$	$0{,}0154\cdot10^{-3}$

Из табл. 1 видно, что

$$S(1000) = S(100) + \sum_{k=2}^{10} \Delta(k\cdot 100) \approx 0,30043 + 0,2511\cdot 10^{-3}\cdot\left(1 + \frac{1}{2,07} + \frac{1}{2,995} + \frac{1}{5,54} + \frac{1}{6,56} + \frac{1}{7,79} + \frac{1}{11,79} + \frac{1}{16,34}\right).$$

Выражение в скобках очень похоже на сумму первых членов гармонического ряда $1+\frac{1}{2}+\frac{1}{3}+\frac{1}{4}+\frac{1}{5}+\frac{1}{6}+\frac{1}{7}+\frac{1}{8}\ldots$ Формула для суммы этого ряда с конечным числом N членов была получена Л. Эйлером:

$$\sum_{k=1}^{N} \frac{1}{k} \approx \ln N + C, \tag{7}$$

где $C = 0,5772\ldots$ – постоянная Эйлера.

Он же доказал, что ряд $\sum_{k=1}^{N} \frac{1}{k^{\alpha}}$ сходится, если $\alpha > 1$. В нашем случае ряд имеет вид:

$$1+\frac{1}{2,07}+\frac{1}{2,995}+\frac{1}{5,54}+\frac{1}{6,56}+\frac{1}{7,79}+\frac{1}{11,79}+\frac{1}{16,34} = 1+\frac{1}{2^{1,05}}+\frac{1}{3^{0,998}}+\frac{1}{4^{1,24}}+\frac{1}{5^{1,17}}+\frac{1}{6^{1,15}}+\frac{1}{7^{1,27}}+\frac{1}{8^{1,31}},$$

то есть, за исключением показателя при 3, все остальные показатели превышают 1, поэтому такой ряд должен сходиться к конечной десятичной дроби. Значение этой дроби пока не найдено, но поиски продолжаются.

4. Для любого простого числа p, кроме 2 и 5, существует число r такое, что последовательная (справа налево) перестановка чисел внутри периода достигается путем умножения дроби $1/p$ на числа $r_k = r^{k-1} (\mathrm{mod}\ p)$, где $v(\mathrm{mod}\ p)$ – остаток от деления v на p, $r = \frac{1 + p\cdot a_L}{10}$, $k = 1, 2, \ldots L$.

Для доказательства этого утверждения запишем равенства, получающиеся из умножения периода дроби $1/p = 0,(a_1a_2a_3\ldots a_{L-1}a_L)$ на число r:

$$\begin{aligned}
&0 + r\cdot a_L = a_1 + c_1\cdot 10,\\
&c_1 + r\cdot a_{L-1} = a_L + c_2\cdot 10,\\
&c_2 + r\cdot a_{L-2} = a_{L-1} + c_3\cdot 10,\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&c_{L-1} + r\cdot a_1 = a_2 + 0.
\end{aligned}$$

Преобразуем эту систему к виду

$$\begin{aligned}
&r \cdot a_L = a_1 + c_1 \cdot 10,\\
&r \cdot a_{L-1} = a_L + c_2 \cdot 10 - c_1,\\
&r \cdot a_{L-2} = a_{L-1} + c_3 \cdot 10 - c_2,\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&r \cdot a_1 = a_2 - c_{L-1}.
\end{aligned}$$

Умножая первое уравнение на 10^0, второе – на 10^1, третье – на 10^2 и т. д., а затем складывая полученные уравнения, приходим к равенству:

$$r \cdot Q = 10^{L-1} \cdot a_L + \frac{Q}{10} - \frac{a_L}{10}, \tag{8}$$

где $Q = \sum_{k=1}^{L} a_L \cdot 10^{L-k} = \frac{10^L}{p}(1 - 10^{-L})$.

Разрешая уравнение (8), получаем окончательное выражение для коэффициента: $r = \frac{1 + p \cdot a_L}{10}$.

Аналогично можно показать, что последовательная (теперь уже слева направо) перестановка чисел внутри периода достигается путем умножения дроби $1/p$ на числа $q_k = q^{k-1} (\mathrm{mod}\, p)$, где $q = 10 - p \cdot a_1$, $k = 1, 2, \ldots L$. Поскольку у всех периодических дробей, кроме 1/3 и 1/7, первая цифра периода равна 0, то для всех чисел $q = 10$.

Рассмотрим числовой пример.

$p = 7$.

$L = 6$, $1/p = 0{,}(142857)$, $a_6 = 7$, $r = (1 + 7 \cdot 7)/10 = 5$, $q = 10 - 7 \cdot 1 = 3$,

$r_1 = 5^0 (\mathrm{mod}\ 7) = \mathbf{1}$, $r_2 = 5^1 (\mathrm{mod}\ 7) = \mathbf{5}$, $r_3 = 5^2 (\mathrm{mod}\ 7) = 25 (\mathrm{mod}\ 7) = \mathbf{4}$,

$r_4 = 5^3 (\mathrm{mod}\ 7) = 125 (\mathrm{mod}\ 7) = \mathbf{6}$, $r_5 = 5^4 (\mathrm{mod}\ 7) = 625 (\mathrm{mod}\ 7) = \mathbf{2}$,

$r_6 = 5^5 (\mathrm{mod}\ 7) = 3125 (\mathrm{mod}\ 7) = \mathbf{3}$.

Найдем частное от деления 1 на 7 в столбик:

```
1          |__7
10         0,142857
 7
 30
 28
  20
  14
   60
   56
    40
    35
     50
     49
      1
```

Заметим, что цифры остатков от деления снизу вверх (выделенные жирным шрифтом) совпадают с коэффициентами r_k.

5. Если анализировать период дроби, например, 1/17 = 0,(142857), то цифры внутри периода располагаются как бы случайным образом, тем не менее возникает вопрос, а нет ли закономерности в расположении или числе цифр внутри периода периодической дроби? Нами показано, что такая закономерность существует. В табл. 2 приведено количество цифр в периоде для первых периодических дробей.

Таблица 2

$p = 7$, $1/7 = 0,(142857)$, $L = 6 = p - 1$, C										
Цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число цифр	**0**	**1**	**1**	**0**	**1**	**1**	**0**	**1**	**1**	**0**
$p = 11$, $1/11 = 0,(09)$, $L = 2 = (p - 1)/5$, C										
Цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число цифр	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**
$p = 13$, $1/13 = 0,(076923)$, $L = 6 = (p - 1)/2$, C										
Цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число цифр	**1**	**0**	**1**	**1**	**0**	**0**	**1**	**1**	**0**	**1**
$p = 17$, $1/17 = 0,(0588235294117647)$, $L = 16 = p - 1$, C										
Цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число цифр	**1**	**2**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**	**2**	**2**	**1**
$p = 19$, $1/19 = 0,(052631578947368421)$, $L = 18 = p - 1$, C										
Цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число цифр	**1**	**2**	**2**	**1**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**1**
$p = 23$, $1/23 = 0,(0434782608695652173913)$, $L = 22 = p - 1$, C										
Цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число цифр	**2**	**2**	**2**	**3**	**2**	**2**	**3**	**2**	**2**	**2**
$p = 29$, $1/29 = 0,(034482758620689655172413793 1)$, $L = 28 = p - 1$, C										
Цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число цифр	**2**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**	**2**
$p = 31$, $1/31 = 0,(032258064516129)$, $L = 15 = (p - 1)/2$, H, $\boldsymbol{n}_k + \boldsymbol{n}_{9-k} = 3$										
Цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число цифр	**2**	**2**	**3**	**1**	**1**	**2**	**2**	**0**	**1**	**1**
$p = 37$, $1/37 = 0,(027)$, $L = 3 = (p - 1)/12$, H										
Цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число цифр	**1**	**0**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**0**	**0**
$p = 41$, $1/41 = 0,(02439)$, $L = 5 = (p - 1)/8$, H										
Цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число цифр	**1**	**0**	**1**	**1**	**1**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**
$p = 43$, $1/43 = 0,(023255813953488372093)$, $L = 21 = (p - 1)/2$, H										
Цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число цифр	**2**	**1**	**3**	**5**	**1**	**3**	**0**	**1**	**3**	**2**

Окончание табл. 2

p = 47, 1/47 = 0,(02127659574468085106382978723404255319148936 17), L = 46 = p – 1, C										
Цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число цифр	4	5	5	4	5	5	4	5	5	4
p = 53, 1/53 = 0,(0188679245283), L = 13 = (p – 1)/4, H										
Цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число цифр	1	1	2	1	1	1	1	1	3	1
p = 59, 1/59 = 0,(01694915254237288135593220338983050847457627 11864406779661), L = 58 = p – 1, C										
Цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число цифр	**5**	**6**	**6**	**6**	**6**	**6**	**6**	**6**	**6**	**5**
p = 61, 1/61 = 0,(01639344262295081967213114754098360655737704918032786885245 9), L = 60 = p – 1, C										
Цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число цифр	**6**	**6**	**6**	**6**	**6**	**6**	**6**	**6**	**6**	**6**

*C – симметрия есть, H – симметрии нет.

Анализ табл. 2 показывает, что в периодических дробях, у которых длина периода – четное число, количество одинаковых цифр симметрично (C) относительно середины, проходящей между 4 и 5, для нечетного числа такой симметрии нет (H). Кроме того, для некоторых периодических дробей сумма количества цифр $n_k + n_{9-k}$ равна числу, стоящему перед 1, где k = 1, 2, 3, 4. Для p = 31 $n_k + n_{9-k} = 3$; для p = 71 $n_k + n_{9-k} = 7$ и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Балыко, А. К.** Свойства периодических дробей / А. К. Балыко, Е. В. Терешкин, И. А. Балыко // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 3. – С. 108 – 113.

2. **Балыко, А. К.** «Непростые» простые числа / А. К. Балыко, Е. В. Терешкин, И. А. Балыко // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2021. – Вып. 1. – С. 53 – 59.

3. **Градштейн, И. С.** Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – М.: ГИФМЛ, 1963. – 1012 с.

4. **Двайт, Г. Б.** Таблица интегралов и другие математические формулы / Пер. с англ.; под ред. К. А. Семендяева. – М.: Наука, 1983. – 226 с.

Статья поступила 23 августа 2021 г.

ЭКОНОМИКА

УДК 621

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ЭКСПОРТНАЯ АКТИВНОСТЬ ПРЕДПРИЯТИЙ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

А. А. Вершинин[1], **М. О. Киричек**[2]

[1]*АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино*

[2]*ГБОУ ВО МО «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королёв*

Отечественное машиностроение играет одну из наиболее важных ролей в общем производственном комплексе страны. Наибольшая часть машиностроения приходится на выпуск транспортных средств. В работе раскрыты факторы, влияющие на экспорт продуктов машиностроения за рубеж и их конкурентоспособность на внешних рынках, проведена оценка экспортной активности национальных компаний в рамках таможенной статистики. Для сравнительного анализа выполнен подсчет стоимости готовых продуктов из передовых областей внешней торговли России. Приведены аргументы в пользу необходимости развития машиностроения на примере мировой практики.

КС: отечественное машиностроение, экспорт, экспортная активность, факторы экспортной активности

CURRENT STATE AND EXPORT ACTIVITY OF DOMESTIC MECHANICAL ENGINEERING ENTERPRISES

A. A. Vershinin[1], **M. O. Kirichek**[2]

[1]*SC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino*

[2]*State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev*

Domestic mechanical engineering plays one of the most important roles in the overall industrial complex of the country. The largest part of mechanical engineering is vehicles production. The paper reveals the factors, influencing the export of mechanical engineering products abroad and their competitiveness in foreign markets, assesses the export activity of national companies in customs statistics. For a comparative analysis, the cost of finished products from the advanced areas of Russian foreign trade was calculated. The arguments in favor of the need for the development of mechanical engineering based on the example of the world practice are given.

Keywords: domestic engineering, export, export activity, factors of export activity

Машиностроение России представляет собой одну из крупнейших отраслей промышленности, на которую приходится доля в 12 % всего российского производства, согласно данным Общероссийского классификатора видов экономической деятельности [1].

Отраслевая структура машиностроения представлена на рис. 1. Превалирует выпуск транспортных средств, среди которых следует выделить такие области, как автомобилестроение и производство железнодорожных грузовых вагонов [2]. Экспортный рекорд в данной области датируется 2018-м годом и составляет $33,7 млрд, согласно статистическим данным Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС) [3].

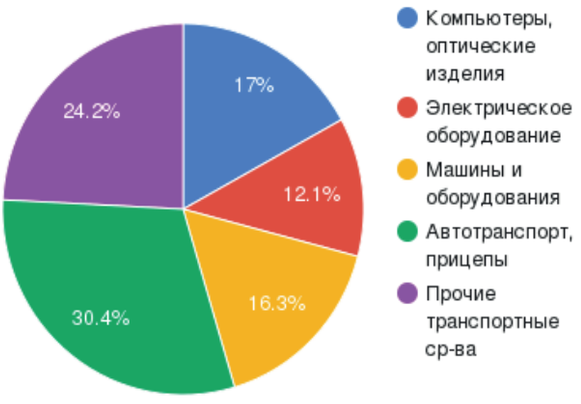

Рис. 1. Отраслевая структура отечественного машиностроения

Согласно данным РОССТАТ, общая сумма в обрабатывающем производстве по отгруженным товарам за 2020 год составляет 45,071 млрд руб., из которых 8,222 млрд приходится на машиностроение [4]. Наибольшую долю в машиностроении составляет производство автотранспортных средств, наименьшую – электрическое оборудование (см. рис. 1).

Говоря об экспорте продукции отечественного машиностроения, по большей части он идет в страны СНГ и в ближнее зарубежье. Выделяются следующие рынки сбыта по направлениям:

- Энергетическое и железнодорожное машиностроение: Польша, Иран, Китай, Болгария, Индия.
- Лесное машиностроение: Вьетнам и Индонезия.
- Автомобильная промышленность (далее – автопром): Беларусь, Казахстан, Узбекистан, Латинская Америка.

Динамика прибыли по областям показывает, что наиболее доходным является экспорт транспортных средств и их комплектующих (рис. 2), но в целом по миру конкурентоспособность национальной продукции машиностроения на внешних рынках оценивается как «низкая». Отдельными областями, где машиностроение имеет неплохой конкурентный потенциал по сравнению с иностранной продукцией, являются: авиастроение – реактивные двигатели, железнодорожное машиностроение – грузовые вагоны, энергетическое оборудование.

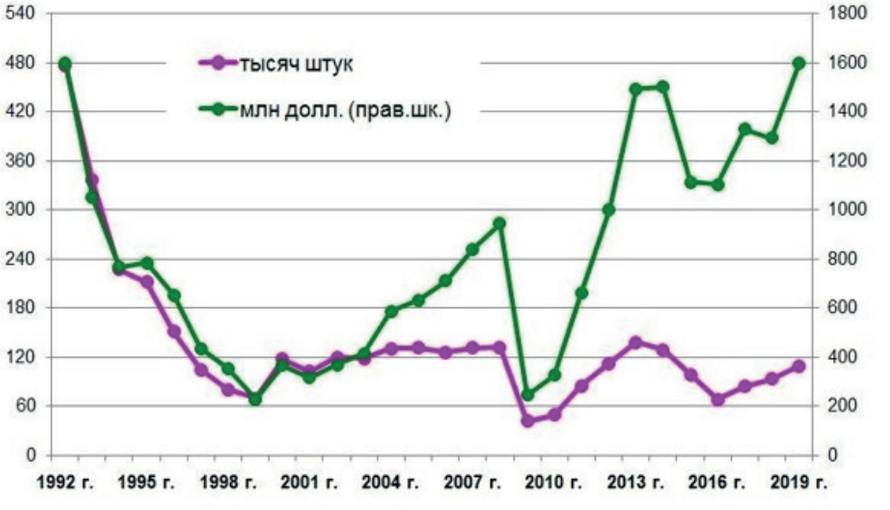

Рис. 2. Динамика экспорта автопрома России по годам

Рассмотрим связку «цена – качество», необходимую для конкурирования на рынке. Отечественная продукция машиностроения в современных условиях не может составить конкуренцию иностранным гигантам из таких стран, как Япония, Китай, США и другие. Согласно статистике агентства «АВТОСТАТ», самые популярные на рынке марки автомобилей, которые реализованы на нём за 2019-й год, представлены двумя лидерами отрасли: Китай – 18114 тыс. штук и США – 12777 тыс. штук. Япония, которая занимает в данном рейтинге 3-е место, имеет существенный разрыв с Китаем и США, реализуя автомобили в количестве 4138 тыс. штук. Далее идут такие страны, как Германия (2732 тыс. штук), Индия (2181 тыс. штук) и т. д., а на 12 строчке располагается Россия – 1271 тыс. штук. Япония по сравнению с Китаем и США имеет разницу в объемах в 4,5 и 3 раза соответственно. При сравнении же России и Японии, первая уступает в 3,2 раза, а по сравнению с первыми двумя странами Россия отстает в объеме выпуска в 14 и 10 раз соответственно, что показывает большую отдаленность от лидеров мировой индустрии в данном сегменте [5].

При этом активы автопрома, который занимает наибольшую долю экспорта машиностроения России, разделены между иностранными компаниями, а производственные мощности заводов также используются ими для производства собственных автомобилей. Альянс «Рено-Ниссан-Мицубиси» (Нидерланды) уже в 2014-м имел долю в капитале АВТОВАЗА, превышающую 50 %. После реорганизации предприятия в 2016 году, АВТОВАЗ становится дочерней компанией Альянса.

По данным Федеральной таможенной службы, экспорт машиностроения за 2020 год составил $25053 млн США, что на 10 % ниже, чем в 2019-м [6]. В процентном соотношении к остальным областям, машиностроение даёт 7,4 % внешнего оборота товаров в денежном эквиваленте, в то время как топливно-энергетические товары дают от 70 % и больше, что иллюстрирует сравнительно небольшой вклад машиностроения. В Российской Федерации экспорт по большей части состоит из сырьевых товаров и природных ресурсов, таких, как нефть, природный газ, никель и др. Согласно статистическим данным Федеральной таможенной службы по 2021 году, внешний товарооборот остается без изменений [8]. На долю машиностроения в общей структуре экспорта приходится в среднем от 2 до 4 % за измеряемый период (2 месяца), в то время как нефтегазовый комплекс дает до 80 % внешнеторгового оборота, за измеряемый период – 75 % (рис. 3). За 2020 год топливно-энергетические товары дали 49,6 % экспортного оборота в денежном измерении [7].

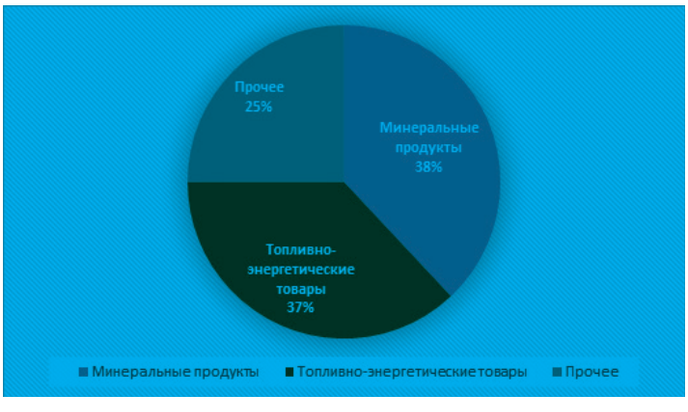

Рис. 3. Структура экспорта РФ за май-июнь 2021 года

На протяжении многих лет экспортная структура Российской Федерации меняется лишь в мелочах, но в своей основе остается неподвижной. Данный факт подмечается и самими таможенными органами в пояснительных документах к статистическим данным, в которых сказано: «Основой российского экспорта в январе – феврале 2021 года традиционно являлись топливно-энергетические товары…» [8].

Несмотря на попытки диверсифицировать российскую экономику, топливно-энергетический комплекс продолжает играть ключевую роль и в российском ВВП, и в доходах Федерального бюджета, и в экспорте.

Мир уже вступил в период развития 6-го технологического уклада. Как и у любого другого, у данного уклада есть ядро, которое состоит из технологий области биогенной инженерии, развития микромеханики, нанотехнологий, суперкомпьютеров, искусственного интеллекта и др. Все перечисленные направления должны обеспечить изменение жизненного уклада, начиная от социальной сферы, заканчивая системами управления, в том числе и государством, путём введения достижений науки в эксплуатацию.

В России 6-й технологический уклад формируется недостаточно высокими темпами. Это порождает проблемы отечественного машиностроения: использование старого (советского) оборудования, без инноваций, даёт низкое качество выпускаемой продукции в современных реалиях; низкая конкурентоспособность из-за невысокого качества выпускаемой продукции на внешних рынках и, как результат, низкие объёмы продаж; недостаточные объемы продаж и низкие обороты по финансам делают предприятие убыточным, и становится невозможным обновление оборудования. В результате получается отсутствие возможностей не только для инноваций, но и для сохранения темпов роста производства на достаточно высоком уровне. На текущий момент отечественное машиностроение является конкурентоспособным на узких сегментах рынка (например, реактивные двигатели). Большинство отраслей машиностроения являются недостаточно развитыми для ведения политики инноваций и развития.

Мировой опыт убедительно показывает, устойчивой может быть только та экономика, в которой основные отрасли машиностроения удовлетворяют порядка 70 % внутреннего спроса. При этом в стоимости выпускаемой машиностроительной продукции доля собственных элементов полного цикла должна быть не менее 40…60 %. Россия обеспечивает внутренний спрос собственными силами не более чем на 30…35 %, а доля собственных элементов составляет 25…30 %.

В торговле, как внешней, так и внутренней, наиболее важным фактором для прибыли является добавочная стоимость. Товары с высокой степенью обработки имеют бóльшую стоимость, чем аналогичный объем материалов, затраченный на их производство.

По данным биржевых котировок, цена на отечественную нефть (марки Urals) довольно сильно скачет, хотя и имеет тенденцию к повышению (рис. 4).

Эталонная нефть марки Brent, добываемая в Северном море, имеет цену (в среднем) $73 за баррель. Urals, добываемая в Башкортостане, Татарстане и Самарской области, уступает в цене и, согласно рис. 4, имеет стоимость в $71,62 за баррель (на 21 июля 2021 года) [9].

Согласно данным компании «Химагрегат», специализирующейся на производстве оборудования для добычи нефти и газа, из одного барреля нефти получается: 85…102 л бензина, 25…30 л дизеля, 20…25 л авиационного керосина, 9…11 л нефтезаводского газа, 5…7 л мазута, 4…5 л сжиженного газа [10]. Проведя расчёты в соответствии с рыночными ценами РФ, получаем, что общая стоимость произведенной продукции из 1 барреля нефти составляет (примерно) 7246,6 руб., в то время как баррель нефти в виде сырья на мировом рынке стоит

5376,37 руб. (по курсу доллара на 22 июля 2021 года – 73,69 руб.). Таким образом, добавочная стоимость обработанной нефти выше.

Рис. 4. Котировки на нефть марки Urals с 2017 г. по текущий момент

Промышленная политика в настоящее время нацелена на расширение производства продукции с высокой добавленной стоимостью. Наибольшая доля добавленной стоимости содержится в готовой высокотехнологичной продукции. К этому разряду принято относить автомобили, электронику, продукцию электротехнической промышленности. Чем сложнее продукт, тем больше интеллектуального капитала затрачено на его создание, а именно интеллектуальный капитал вносит самый большой вклад в добавленную стоимость.

Таким образом, в современных реалиях отечественному машиностроению необходимо сделать следующие шаги.

Произвести обновление основных средств, таких, как оборудование и станки. Одним из источников финансирования данного предложения является увеличение государственных заказов не только в области оборонно-промышленного комплекса, но и во многих других жизненно необходимых отраслях.

Также необходимо снизить «бюрократию» и нагрузку на систему управления. В настоящий момент происходит искусственное торможение развития за счет нововведений, связанных с новыми методами контроля и противодействия коррупции, особенно на предприятиях с государственным партнерством.

Повышение инвестиционного климата как для внутренних, так и для внешних инвесторов также позволит получить новые вливания. Это возможно за счет снижения избыточного контроля и различного рода налоговых преференций.

На уровне государственных структур создать все возможные условия и почву для возможности приобретения того или иного оборудования за местную валюту. Например, чтобы избавиться от необходимости расчетов в долларах, с китайскими партнерами иметь связку рубль-юань.

Повысить интерес со стороны государства в развитии инноваций, а также оказывать поддержку и создавать всевозможную благоприятную среду для развития новых технологий.

ВЫВОДЫ

В основе развития российского машиностроения лежит некоторое количество комплексных проблем, которые затрагивают не только машиностроение, а и весь бизнес. Инвестиционный климат, модернизация производства – это то, что в первую очередь требует внимания и приведет к развитию данного сектора производства. Фундаментом инновационного развития государства является развитое, сбалансированное машиностроение, в максимальной степени реализующее перспективную схему полного производственного цикла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Объем отгруженных товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами по Российской Федерации. Годовые данные. Данные по «Общероссийскому классификатору видов экономической деятельности» (КДЕС Ред. 2).

2. Федеральная служба государственной статистики (РОССТАТ) [Электронный ресурс]. – Промышленное производство. Объем отгруженных товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами. Данные по ОКВЭД 2 (КДЕС ред. 2): Объем отгруженных товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами по отдельным видам экономической деятельности Российской Федерации – Режим доступа: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (дата обращения 15.07.2021).

3. Единая межведомственная информационно-статистическая система «Объем экспорта продукции машиностроения» [Электроный ресурс] – Режим доступа: https://www.fedstat.ru/indicator/59180 (дата обращения 15.07.2021).

4. Федеральная служба государственной статистики (РОССТАТ) [Электронный ресурс]. – Промышленное производство. Объем отгруженных товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами, Данные по ОКВЭД 2 (КДЕС ред. 2): Объем отгруженных товаров собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами по Российской Федерации. Годовые данные – Режим доступа: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (дата обращения 17.07.2021).

5. Аналитическое агентство «Автостат»: «Ведущие авторынки мира по итогам 9 месяцев 2019 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.autostat.ru/infographics/41644 (дата обращения 19.07.2021).

6. Федеральная таможенная служба Российской Федерации: статистические данные [Электронный ресурс]. – Экспорт России важнейших товаров Январь-Декабрь 2020. – Режим доступа: https://customs.gov.ru/statistic/eksport-rossii-vazhnejshix-tovarov (дата обращения 20.07.2021).

7. Федеральная таможенная служба Российской Федерации: статистические данные [Электронный ресурс]. – Экспорт и импорт Российской Федерации по товарам. Товарная структура экспорта. – Режим доступа: https://customs.gov.ru/statistic (дата обращения 20.07.2021).

8. Федеральная таможенная служба Российской Федерации: статистические данные [Электронный ресурс]. – Экспорт и импорт Российской Федерации по товарам. Пояснения к таблицам. – Режим доступа: https://customs.gov.ru/statistic (дата обращения 20.07.2021).

9. Фьючерсы на нефть Urals, Brent: цена и курс [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.profinance.ru/chart/brent (дата обращения 21.07.2021).

10. АО «Группа компаний «ХИМАГРЕГАТ»: информационный центр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://himagregat-info.ru/popular/chto-mozhno-poluchit-iz-odnogo-barrelya-nefti (дата обращения 21.07.2021).

Статья поступила 30 августа 2021 г.

УДК 338

ВНУТРИХОЛДИНГОВЫЙ БАЛАНС «ЗАТРАТЫ – ВЫПУСК» ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСА

Д. Г. Шутов

АО «Росэлектроника», г. Москва

На основе теории межотраслевого баланса «затраты – выпуск» лауреата Нобелевской премии по экономике В. В. Леонтьева создана цифровая система организации процессов управления предприятиями в радиоэлектронном комплексе (РЭК), разработаны математические модели внутрихолдингового баланса «затраты – выпуск» предприятий, объединенных в РЭК, и продукции этих предприятий, рассмотрены пути реализации предложенных моделей внутрихолдингового баланса на практике.

КС: внутрихолдинговый баланс, математическая модель ВХБ, матрица технологических коэффициентов, цифровое производство

THE INTRA-HOLDING BALANCE «COSTS – OUTPUT» FOR ENTERPRISES OF RADIOELECTRONIC COMPLEX

D. G. Shutov

JSC «Ruselectronics», Moscow

Based on the theory of interindustry balance «costs – output» by the Nobel Prize Laureate in economics V. V. Leontyev, a digital system for organizing the processes of managing the enterprises in radioelectronic complex (REC) was created, mathematical models of intra-holding balance «costs – output» of the enterprises united in REC and the products of these enterprises were developed, the ways for implementation of the proposed models of intra-holding balance in practice were considered.

Keywords: intra-holding balance, mathematical model of IHB, technological coefficients matrix, digital production

1. ВВЕДЕНИЕ

Объединение компаний пяти дивизионов под началом АО «ОПК» (далее – холдинг) открывает «окно возможностей» по созданию сквозного цикла производства продукции:

– электронных материалов;
– электронной компонентной базы;
– электронных модулей, радиоэлектронного оборудования;
– автоматизированных систем управления;
– средств связи.

Предприятия холдинга производят непрерывную или дискретную во времени цепочку товаров, представленную материальной и стоимостной сущностью. Началом производственной цепочки холдинга являются электронные материалы, окончанием – АСУ и средства связи. Перетекание материальной и стоимостной сущностей по цепи товаров осуществляется от низших переделов к высшим, от низкомаржинальных продуктов к высокомаржинальным.

Среди моделей математического моделирования этих процессов наиболее приемлемой представляется модель межотраслевого баланса. В конце XIX – начале XX веков в этом направлении работали известные русские экономисты В. К. Дмитриев, Л. Н. Литошенко, П. И. Попов. В 1924 г.

в Советской России впервые в мировой истории был разработан баланс экономики страны за прошедшие 1923 – 1924 гг. и дан прогноз экономики на 1924 – 1925 гг. [1]. Молодой экономист В. В. Леонтьев в 1925 г., будучи студентом университета, опубликовал свою работу «Баланс народного хозяйства СССР» в журнале «Плановое хозяйство». Он предложил усовершенствовать теорию баланса народного хозяйства советских ученых-экономистов: для близких отраслей – методологию технического анализа, для несвязанных отраслей – методологию хозяйственного анализа [2]. На большом фактическом материале [3–4] В. В. Леонтьев показал, что соотношения продукции (коэффициенты взаимопроникновения) в различных взаимозависимых отраслях носят устойчивый характер, мало меняющийся на протяжении десятилетий. Эта идея легла в основу уравнений межотраслевых балансов экономики. В довоенные годы В. В. Леонтьев применил свой метод для анализа экономик США и Германии. Послевоенное японское «экономическое чудо» также зиждилось на системе межотраслевых балансов. Тысячи цепочек балансов пронизывали японскую экономику от производства сырья до производства автомобилей. За разработку системы межотраслевого баланса «затраты – выпуск» в 1973 г. русский экономист В. В. Леонтьев был удостоен Нобелевской премии по экономике.

Математическая модель межотраслевого баланса «затраты – выпуск» применима для процессов выпуска продукции радиоэлектронной промышленности. Подтверждением этого служит жесткий регламент выпуска, например, каждого конкретного типономинала ЭКБ. Действительно, в конструкторско-технологической документации на любой, например, транзистор или микросхему конкретно указано, сколько и какого материала используется, какие покупные (или собственного производства) комплектующие изделия (ПКИ) применяются для производства. Следовательно, вклад материалов и ПКИ в себестоимость продукции определен. При помощи конкретных маршрутных карт можно установить вклад цепочки переделов в себестоимость продукции при ее производстве.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ «ЗАТРАТЫ – ВЫПУСК», АДАПТИРОВАННАЯ К ВНУТРИХОЛДИНГОВОМУ БАЛАНСУ

2.1. Модель применительно к предприятиям холдинга

Пусть y_i – выпуск продукции i-го предприятия для потребления за пределами контура холдинга, а $y = (y_1, y_2, y_3, ..., y_n)^T$ – вектор выпуска всей продукции предприятий (где n – общее число предприятий холдинга) для потребления вне контура. Обозначим через A матрицу технологических (или стоимостных) коэффициентов, где элемент матрицы a_{ij} – необходимый объем продукции i-го предприятия холдинга (или стоимости продукции i-го предприятия в стоимости единицы продукции j-го предприятия) для производства единицы продукции j-го предприятия холдинга.

Пусть x_i – совокупный выпуск продукции i-го предприятия, соответственно $x = (x_1, x_2, x_3, ..., x_n)^T$ – вектор совокупного выпуска всех предприятий холдинга.

Совокупный выпуск всех предприятий холдинга складывается из двух компонентов: выпуска для потребления вне контура и выпуска для потребления предприятиями внутри контура (для обеспечения производства продукции других предприятий холдинга). Выпуск для потребления предприятиями холдинга определяется с помощью матрицы технологических коэффициентов как Ax.

Соответственно в сумме с конечным потреблением y получим совокупный выпуск x:

$$x = Ax + y. \quad (1)$$

Конечное уравнение баланса

$$x = (I - A)^{-1}y, \quad (2)$$

где I – единичная матрица размерности матрицы A.

Матрица

$$(I - A)^{-1} \quad (3)$$

получила название матричный мультипликатор. Полученное выражение справедливо и для приращений выпусков.

Для холдинга, состоящего, например, из 160 предприятий, размерность матрицы A – 160×160.

2.2. Модель применительно ко всей продукции холдинга

Существует принципиальная возможность применения представленной модели (1)…(3) для построения внутрихолдингового баланса (ВХБ) цепочек конкретной товарной продукции, однако объем вычислений при этом многократно возрастает. В приложении к конкретным товарным продуктам это выглядит следующим образом: A – матрица технологических (или стоимостных) коэффициентов, где элемент матрицы a_{ij} – необходимый объем i-го продукта, производимого в холдинге, для производства единицы j-й продукции, произведенной в холдинге (или стоимость i-го продукта холдинга в стоимости единицы j-го продукта холдинга). При этом x_i – совокупный выпуск i-го продукта в холдинге, соответственно $x = (x_1, x_2, x_3, ..., x_m)^T$ – вектор совокупного выпуска всех продуктов холдинга (m – полный ассортимент продукции всех предприятий холдинга), а y_i – совокупный выпуск i-го продукта, произведенного в холдинге для потребления вне контура, соответственно $y = (y_1, y_2, y_3, ..., y_m)^T$ – вектор выпуска всех продуктов для потребления вне контура. В этих обозначениях система линейных уравнений (1)…(3) при ее решении даст экономическую модель баланса всей продукции холдинга (РЭК).

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВХБ

С практической точки зрения наиболее интересна 2-я модель внутрихолдингового баланса (ВХБ 2), которая содержит все цепочки производства продукции холдинга. Именно эта модель будет способствовать снижению и оптимизации уровня выпадающих доходов, поскольку автоматически покажет все корпоративные связи между предприятиями холдинга. Кроме того, при определенной трансформации модели ВХБ 2 можно будет организовать возможные замещения сырья и комплектующих изделий, поступающих из-за пределов контура холдинга. ВХБ 2 позволит достаточно быстро определять возможности предприятий по выпуску продукции в заданных объемах в заданное время, позволит рассчитать государственные ресурсы, необходимые предприятиям для решения государственных задач. Предложенная модель ВХБ 2 даст возможность решать задачи как в целом для радиоэлектронного комплекса, так и дифференцированно для конкретного предприятия холдинга.

Техническая реализация модели ВХБ 2 потребует большой административной работы и значительных вычислительных мощностей. В зависимости от объема оцифровки продукции холдинга, система ВХБ 2 может содержать десятки тысяч линейных уравнений, которые потребуют решения с учетом поставленной задачи.

Результаты исследований, полученные с применением первой модели внутрихолдингового ба-

ланса (ВХБ 1), можно взять за основу построения автоматизированной плановой стратегии развития предприятий РЭК.

4. НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ ВХБ

Для реализации модели ВХБ изучены автоматизированные модели организации производства на крупнейшем предприятии дивизиона ЭКБ и СВЧ – АО «НПП «Исток» им. Шокина». На предприятии разработан программный продукт «Цифровое производство», который является интеграционной платформой для увязки всех систем предприятия и контроля параметров его деятельности.

Программный продукт «Цифровое производство» состоит из четырех подсистем, три из которых представляют особый интерес для насыщения системы ВХБ необходимыми данными.

4.1. Подсистема планирования производства

Подсистема позволяет создать оперативно-календарный план производства, сформировать план поставок материалов и комплектующих, вести учет выполненных работ и выданных по заказам материалов. В интересах ВХБ полезны следующие функции подсистемы:

- определение потребности в материалах, комплектующих и инструменте;
- учет и контроль поставок, хранения и использования в производстве материалов и комплектующих;
- учет поступлений из производства, отгрузки и хранения готовой продукции;
- отображение всех отклонений фактической себестоимости от нормативной;
- учет выполнения операций по количеству, фактической трудоемкости и исполнителю работ;
- формирование маршрутов изготовления деталей и сборочных единиц;
- формирование нормативных данных по технологическому маршруту изготовления;
- импорт данных из внешних систем, исключающий дополнительный ввод данных и автоматически формирующий все необходимые справочники;
- получение полного комплекта документов – маршрутной карты, спецификации и других, согласно ГОСТ.

4.2. Подсистема «Технология»

Подсистема разработана для формирования технологической документации.

Основные функции:

- импорт конструкторских спецификаций (КС) из PDM-систем;
- создание электронных спецификаций в соответствии с ГОСТ ЕСКД;
- создание технологических процессов (ТП) на основе базы данных;
- формирование типовых технологических процессов (ТТП) и групповых технологических процессов (ГТП);
- создание единичных ТП из ТТП/ГТП;
- ведомость материалов;
- ведомость трудоемкости;
- ведомость оснастки;
- ведомость покупных комплектующих изделий.

4.3. Подсистема нормативно-справочной информации

Подсистема разработана на базе платформы 1С для организации обмена НСИ между модулями программного продукта и внешними информационными системами производственных предприятий.

Основные функции:

- управление содержимым справочников НСИ;
- просмотр и поиск содержимого справочников НСИ;
- управление заявками на добавление/изменение справочной информации;
- создание и настройка произвольных справочников в пользовательском режиме;
- синхронизация справочников НСИ;
- интеграция (загрузка/выгрузка) справочников НСИ.

Эта важнейшая подсистема является основой для создания «Цифрового предприятия» в отрасли российской электроники и реализации цифрового горизонтального и вертикального управления промышленным предприятием.

Использование программного продукта «Цифровое производство» АО «НПП «Исток» им. Шокина» позволит насытить ВХБ данными в части продукции, им производимой. При отсутствии на других предприятиях программного продукта «Цифровое производство» необходим анализ конструкторско-технологической документации, расширенных планов закупок, планов производства и другой документации для целей ВХБ.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация на практике представленной модели внутрихолдингового баланса средствами суперкомпьютерного моделирования будет способствовать:

– снижению и оптимизации уровня «выпадающих» доходов;

– определению возможностей предприятий по выпуску той или иной продукции;

– построению цифровой динамической стратегии развития предприятий радиоэлектронного комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баланс народного хозяйства Союза ССР 1923 – 1924 года / Репринтное воспроизведение издания 1926 г. – М.: Республиканский информационно-издательский центр, 1993.

2. **Леонтьев, В.** Баланс народного хозяйства СССР. Методологический разбор работы ЦСУ/ В. Леонтьев // Плановое хозяйство: Ежемесячный журнал. – М.: Госплан СССР, 1925. – № 12. – С. 254 – 258.

3. **Леонтьев, В.** Исследования структуры американской экономики / В. Леонтьев, Холлис В. Ченери, Пауль Г. Кларк, Джеймс С. Дюзенбери, Аллен Р. Фергюсон, Энн П. Гроссе, Роберт Н. Гроссе, Матильда Хольцман, Уолтер Изард, Хелен Кистин; пер. с англ. А. С. Игнатьева; под ред. А. А. Конюса. – М.: Госстатиздат, 1958. – 640 с.

4. **Леонтьев, В.** Экономические эссе (1966, 1977). Теории, исследования, факты и политика / В. Леонтьев; пер. с англ. – М.: Политиздат, 1990. – 415 с.

Статья поступила 7 сентября 2021 г.

ИСТОРИЯ

УДК 9

НАШИ ДОКТОРА НАУК

А. К. Балыко, Т. А. Балыко

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

OUR DOCTORS OF SCIENCE

A. K. Balyko, T. A. Balyko

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

За всю историю НПП «Исток» начиная с 1943 года на предприятии работало 47 докторов наук. В предыдущих выпусках нашего научно-технического сборника уже были опубликованы статьи о докторах технических наук С. И. Реброве, Н. Д. Девяткове, А. Н. Королеве, В. С. Лукошкове, Р. А. Силине, В. Г. Калине, М. Б. Голанте, А. С. Тагере, А. С. Победоносцеве. Продолжим наши публикации.

БОРИС ЧЕСЛАВОВИЧ ДЮБУА

Борис Чеславович Дюбуа родился 13 августа 1934 года.

Он был талантливым и многогранно одаренным человеком с широчайшим кругом интересов. С его уходом из жизни в 2012 г. НПП «Исток» и наукоград Фрязино лишились выдающегося ученого, доктора физико-математических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации, создателя уникальных технологий изготовления катодов – основного узла всех электровакуумных приборов, крупного организатора науки и производства, известного музыканта, пианиста-аккомпаниатора.

Б. Ч. Дюбуа

На протяжении нескольких десятилетий на «Истоке» он возглавлял одно из самых важных подразделений – катодный отдел, в котором проработал 55 лет. При этом Борис Чеславович всегда высоко ценил ту роль, которую сыграли в становлении катодного отдела первый его начальник, один из основателей отечественной эмиссионной электроники Б. М. Царев, руководители отдела Б. Н. Попов, Л. А. Тимошин и А. В. Морозов, академик Н. Д. Девятков, начальник химико-технологического отдела лауреат Ленинской премии Г. А. Метлин, доктора наук Б. П. Никонов

и А. Б. Киселев, а также видные отечественные ученые и технологи-практики А. И. Мельников, А. А. Маклаков, А. В. Дружинин, Ю. А. Кондрашенков, Н. Г. Отмахова, Г. А. Кудинцева, А. Я. Князев, И. П. Стародубов, В. И. Некрасов, С. Е. Рожков, Ю. В. Гурков и другие. Благодаря их усилиям и усилиям многочисленных сотрудников катодного отдела, были открыты и развиты новые направления в катодной электронике, созданы уникальные типы катодов, отработана технология их изготовления, повторить которую зачастую безуспешно пытаются ученые многих стран.

Борис Чеславович был выдающимся отечественным ученым. Он защитил докторскую диссертацию, едва перешагнув порог своего 35-летия. Успеху теории и практики создания уникальных катодов способствовали разработанные под его руководством и при его непосредственном участии методики и оборудование для импульсных измерений термоэлектронной и вторично-электронной эмиссии, испарения компонентов, термографического анализа, адсорбции, эмиссионной микроскопии, ОЖЕ-спектрометрии. В 70-е годы прошлого столетия Б. Ч. Дюбуа совместно с И. П. Стародубовым, О. К. Култашевым, С. Е. Рожковым создали новый класс вторично-эмиссионных катодов, не имеющих аналогов за рубежом.

Научные достижения Б. Ч. Дюбуа высоко оценены ученым миром. Доктор физико-математических наук, лауреат Государственной премии СССР, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, член ряда диссертационных советов. Борис Чеславович неоднократно избирался в состав организационных комитетов международных и отечественных научных конференций и симпозиумов, был многолетним членом редакционной коллегии журнала «Электронная техника», сер. 1, «СВЧ-техника». Его имя часто можно было видеть в различных научных журналах и на обложках книг – он автор более 150 научных статей, научно-технических отчетов, изобретений. Он не только сам генерировал новые идеи, но и всемерно пропагандировал изобретательство как высшую форму проявления человеческого разума.

Борис Чеславович заботливо относился к подрастающему поколению ученых и инженерных работников. В советский период он был бессменным председателем технологических секций на научно-технических конференциях, выставках, конкурсах, проводимых Советом молодых специалистов и ученых «Истока». Под его руководством десятки студентов выполнили дипломные работы. Несколько последних лет он преподавал в филиале МИРЭА при НПП «Исток».

Борис Чеславович был тонким знатоком музыки, поэзии, архитектуры, отечественной истории. Он сам прекрасно играл на фортепиано. Фрязинцам старшего поколения памятны его восхитительные музыкально-поэтические вечера совместно с одаренной артистическими способностями Мариам Пипко, работавшей в отделе 100 НПП «Исток» переводчицей немецкого языка. Эти вечера, посвященные поэзии М. Цветаевой, А. Ахматовой и другим замечательным поэтам, собирали полный зал в городском клубе «Факел».

Б. Ч. Дюбуа обладал редким для крупного ученого талантом. Он с одинаковым интересом рассказывал об удивительных результатах своих научных коллег, о поэзии А. С. Пушкина, которую знал глубоко, как истинный пушкиновед, о музыке и музыкантах, о таинственных местах проживания людей на земле. Борис Чеславович был человеком с глубоким пониманием жизни, с критической и иронической жилкой, автором удивительных по красоте языка рассказов. Общение с ним доставляло подлинное удовольствие и некоторое волнение перед широтой и глубиной человеческой памяти. Он обладал памятью и талантом поистине энциклопедиста. О чем бы не зашла речь, он знал об этом так, как будто сам недавно там побывал. Когда Т. А. Балыко поехал туристом в Бирму к месту предполагаемого истока цивилизации человечества, Борис

Чеславович, узнав об этом, очень удивился: «Как же он туда доберется, ведь там на протяжении десятков километров непроходимые джунгли?»

Важная черта Бориса Чеславовича, достойная глубокого уважения, – это его отзывчивость, исходившая от самого сердца. Он любил людей и поэтому всегда стремился помочь любому человеку, который обращался к нему за помощью в научной области и в жизни: студенту-первокурснику, молодому специалисту, опытному сотруднику, начальнику цеха или члену дирекции. Причем помощь эта всегда была конкретной и информативно исчерпывающей.

Борис Чеславович Дюбуа умер 14 июля 2012 года. На «Истоке» с уважением и любовью вспоминают выдающегося ученого, отдавшего свой талант развитию отечественной науки и техники, и замечательного человека, посвятившего свою жизнь Фрязино и фрязинцам.

В 1999 году, в канун 200-летия А. С. Пушкина, мы обратились к Борису Чеславовичу с просьбой поделиться своими представлениями о гении русской литературы. Надеемся, что даже часть из этого рассказа, написанная им лично, станет еще одним нашим поминанием выдающегося истоковского ученого и российского гражданина.

Постигая А. С. Пушкина

На мой взгляд, для того чтобы по-настоящему постичь А. С. Пушкина, надо пройтись по местам его пребывания. Образно говоря – постичь его не только сердцем, но и ногами. За 10 лет мне удалось побывать практически во всех местах, связанных с именем великого поэта.

Особенно интересно было гулять по Санкт-Петербургу. При этом важно знать, что центральная часть города сохранилась почти в том же виде, какой ее видел Пушкин. Фактически вся она была выстроена при нем. Вообще говоря, с архитектурой и живописью во времена Пушкина, на мой взгляд, дела обстояли хорошо – высокая техника и культура живописи, вспомните хотя бы «Последний день Помпеи» Карла Брюллова. Вот так бродишь по Пушкинским местам и невольно весь 19 век связываешь с его именем, думаешь, что он мог видеть, знать, слышать?

С музыкой в России в то время было хуже, чем с живописью. Сам Пушкин музыкального образования не получил. Моцарта слушал мало, а Сальери – тем паче – совсем ничего. И, тем не менее, увековечил беспочвенный слух о том, что Сальери якобы отравил Моцарта. А они просто никогда не встречались. Между тем Антонио Сальери был прекрасным музыкантом и педагогом. Его учениками были Ф. Шуберт, Ф. Лист, Л. Бетховен. Русская музыкальная культура в России тогда только зарождалась, и связано это было с другим великим именем – М. Глинкой. Хотя его первая опера «Иван Сусанин» оставила Пушкина равнодушным. Но некоторые другие интеллектуалы из окружения Пушкина приняли оперу «Иван Сусанин» с восторгом. Среди них – Н.В. Гоголь, музыковед В. Одоевский. Правда, к этой опере плохо относился и сам царь, считая ее слишком народной.

В те времена большое развитие получила хоровая церковная музыка. Березовский и Бортнянский создали новый тип русского хорового концерта. Но Пушкин в церковь ходил редко, вероятно, считал, что замаливать ему нечего, а любовь к женщинам – не грех. Балет в России тоже находился пока в стадии становления – Дидло много сделал для русского балета, но должен был все-таки появиться Мариус Петипа, чтобы поднять балерину с «полупальцев» на «пальцы». Так что Пушкин, к сожалению, еще не мог видеть в балете всех возможностей женских ножек.

Велика заслуга Пушкина, наряду с Карамзиным, в создании отечественной исторической науки, базу которой составляют точно изложенные факты истории. Как он бился над тем, чтобы получить доступ к архивам, связанным с бунтом Пугачева, сколько объездил городов, скольких опросил непосредственных свидетелей! И, в конце концов, получил довольно точную картину событий. А все родственники Пугачева, хотя и не участвовали в бунте, сидели в тюрьме. Кстати, сам Пушкин, как первый российский поэт-диссидент, был невыездным – царь не пускал. Дважды Пушкин пытался бежать за границу, но все неудачно.

Конечно, было бы очень интересно по каким-то намекам постичь, насколько Пушкин был в курсе развития не только гуманитарных, но и естественных наук. Ведь в журнале «Современник» он планировал создать специальный научный отдел, в котором в популярной форме излагались бы основные достижения в различных областях знаний. Это было тогда новым и для многих неожиданным и ненужным делом. А ведь в начале XIX века закладывались основы знаний о природе электрических сил: итальянский физик и физиолог Вольта создал химический источник тока, открыл контактную разность потенциалов, английский физик Фарадей открыл электромагнитную индукцию, французский физик Ампер обнаружил механическое взаимодействие токов и т. д.

Царское Село, Михайловское… Эти места наиболее известны. Ежегодно в Псковскую область приезжают тысячи туристов. Я обошел практически все селения, где мог бывать Пушкин. Я посетил места на Урале, где А. Пушкин собирал материалы для «Капитанской дочки» – Казань, Оренбург, Уральск. В каждом городе есть музей Пушкина. Один год я посвятил Прибалтике. Пушкин часто болел и ездил лечиться в Ригу. Я как-то мало был знаком с пребыванием А. С. Пушкина в Калужской губернии, в частности на Полотняном заводе. История завода сама по себе очень интересна. В свое время здесь останавливались М. И. Кутузов и Наполеон. А еще раньше Полотняный завод посещала императрица Екатерина – завод производил лучшую в России бумагу и поставлял ее в царский дом. К приезду Екатерины готовились и отлили ей бронзовый памятник. Кто-то рассказал об этом Пушкину, он его разыскал и даже пытался продать по сходной цене – нужны были деньги на предстоящую свадьбу. Я много ходил по этим местам.

Меня всегда поражала память А. С. Пушкина. Читаешь его произведения – в них все слова вроде бы известные. Гениальность его в том и проявлялась, что он мог быстро подбирать нужное слово и вставлять его в нужное место. Простому человеку сделать это не так просто. Поражает в нем и дар самообразования. Ведь все его официальное образование – это лицей, по-нашему, просто школа, где готовили просвещенных чиновников. Да, отбирали в лицей детей одаренных, но готовили чиновников. И, по существу, немногие выпускники стали выдающимися людьми. На память сразу приходит только имя великого российского ученого и адмирала Федора Федоровича Матюшкина, одного из первопроходцев и исследователей нашего Севера, и Дальнего Востока, и Русской Америки. О многих же, если бы не Пушкин, мы бы вообще никогда не узнали. Все, чего достиг А. С. Пушкин, явилось следствием его неуемной страсти к просвещению. Он много читал и много думал. Гению не потребовалось заканчивать университетов, он, как губка, впитывал в себя все увиденное, услышанное и прочитанное.

ВИЛИОР ПАВЛОВИЧ САЗОНОВ

В. П. Сазонов

Выдающийся советский и российский ученый, доктор технических наук, профессор Вилиор Павлович Сазонов на протяжении многих лет возглавлял теоретический отдел, по праву считался главным теоретиком предприятия и был ценимым и уважаемым ученым в научной среде «электронщиков» в нашей стране и за рубежом.

Он родился 13 октября 1931 года на пограничной заставе в г. Пяндже (Таджикистан). Родители нарекли его необычным именем – Вилиор, составленным из первых букв символичной связки Владимир Ильич Ленин и Октябрьская Революция. Однако, несмотря на столь «политическое» имя, в дальнейшем его больше привлекали наука и техника, и после учебы в суворовском училище и в средней школе Вилиор поступил в один из лучших вузов страны – Киевский политехнический институт с всемирно известными учеными-педагогами. Закончить такой вуз с отличием – большое достижение для любого студента. В. П. Сазонов это сделал и получил квалификацию инженера-физика по специальности «Техническая электроника». С января 1954 г. и всю последующую жизнь работал на нашем предприятии.

Стремительно началась его трудовая деятельность в стенах «Истока». Всего семь лет потребовалось Вилиору Павловичу, чтобы пройти путь от техника (в период преддипломной практики) до старшего научного сотрудника, которым он стал после блестящей защиты кандидатской диссертации.

В 1962 году прозорливый В. С. Лукошков, начальник теоретического отдела, предложил стать его преемником именно ему, 30-летнему молодому ученому. Выбор Владимира Сергеевича оказался на редкость удачным. 40 лет В. П. Сазонов руководил, как считалось на предприятии, умнейшими сотрудниками «Истока» – теоретиками. В своем кабинете он повесил портрет своего учителя – В. С. Лукошкова. Все годы руководства теоретическим отделом Вилиор Павлович продолжал развивать лучшие идеи Владимира Сергеевича. Отдел вырос в отделение, набрал силу, сотрудники решали сложнейшие научно-технические задачи, писали отчеты и статьи, защищали диссертации, с успехом выступали на всесоюзных и международных конференциях. В 2006 году, к 100-летию со дня рождения В. С. Лукошкова, сотрудники отделения издали книгу о выдающемся ученом, больше половины текста в которой написал лично В. П. Сазонов.

Важное значение в плодотворной трудовой деятельности коллектива имела дружеская атмосфера, царившая в отделе. Сотрудники вместе отдыхали, участвовали в спортивных соревнованиях, многочисленных культурных мероприятиях. При этом Вилиор Павлович не только активно поддерживал все эти мероприятия, но и никогда не отказывался играть в них любые роли. До сих пор сотрудники отделения вспоминают КВН, в котором начальник отдела выступал в роли Красной Шапочки. На новогодних вечерах отдела, продолжавшихся, как правило, до утра, он был самым галантным кавалером в бальных танцах.

Хорошая теоретическая и практическая подготовка позволяла В. П. Сазонову быстро осваиваться в различных областях науки и техники. Более всего он известен как ученый в области электровакуумной СВЧ-электроники. В 50-х годах прошлого столетия им были выполнены фундаментальные исследования и написана блестящая и всеобъемлющая статья по спиральным

замедляющим системам, интерес к которым не увядает по сей день. Решению сложнейшей проблемы по выводу СВЧ-энергии из электровакуумных приборов посвящена его докторская диссертация. Вместе с тем В. П. Сазоновым с сотрудниками был выполнен ряд интересных и важных работ и в других областях науки, техники, а также в медицине. Много сил и времени он с коллегами уделил изучению и экспериментальной проверке связи в СВЧ-диапазоне. Было проведено несколько экспедиций на Черное море и Дальний Восток. Результаты работы докладывались на самом высоком государственном уровне.

Существенный вклад Вилиор Павлович внес в разработку теории, методов расчета и автоматизированного проектирования СВЧ-приборов. В 1976 году приказом министра он был назначен главным конструктором подотрасли по разработке систем автоматизированного проектирования (САПР) изделий электронной техники. Под его руководством в отделении был организован уникальный в своем роде фонд алгоритмов и программ для ЭВМ, включающий в себя более 500 программ.

Вилиор Павлович обладал редким даром доступно писать научные статьи, интересно рассказывать о самых сложных физических явлениях. Он является автором 170 печатных работ, монографии «Замедляющие системы» (совместно с Р. А. Силиным), пяти брошюр. С проблемными докладами В. П. Сазонов выступал на многочисленных конференциях, в том числе в США, Японии, Австрии, Южной Корее и КНР. Его научно-популярными статьями об основных направлениях развития электроники в 21 веке, опубликованными в газете «За передовую науку», зачитывались сотрудники «Истока».

По природе В. П. Сазонов – изобретатель, что позволяло ему не только исследовать известные приборы, но и предлагать новые, оригинальные конструкции, порой дерзко неожиданные по своим техническим решениям. В его активе 20 авторских свидетельств на изобретения и столько же патентов. Эту сферу научной деятельности он не прерывал до конца жизни.

Из воспоминаний А. К. Балыко: «В конце 80-х годов у меня был аспирант Анатолий Александрович Осипов, который занимался оконечными нагрузками мощных СВЧ-приборов. На экзамене по специальности профессор Р. А. Силин выявил у него недостаток знаний по теоретической электродинамике и, несмотря на то, что я и доцент К. И. Алмазов-Долженко говорили об уникальном практическом таланте специалиста из НПК-5, не соглашался поставить ему удовлетворительную оценку. Наш спор должен был разрешить председатель экзаменационной комиссии В. П. Сазонов. В назначенный час А. А. Осипов пришел в кабинет к Вилиору Павловичу с двумя чемоданами изобретенных им различных конструкций оконечных нагрузок и начал рассказывать о каждой из них. С каждой минутой глаза В. П. Сазонова разгорались все больше и больше, он постоянно прерывал изобретателя, задавал ему вопросы и восторженно завершил экзамен словами: «Я Вам однозначно ставлю оценку «отлично», но из-за Вашего разногласия с профессором Р. А. Силиным нам необходимо встретиться втроем». К сожалению, практически в это же время А. А. Осипов втянулся в начавшиеся выборные баталии различных уровней, проиграл выборы и так и не закончил аспирантуру».

Широко известна общественная научная и педагогическая деятельность В. П. Сазонова. На протяжении десятилетий он бессменно входил в составы диссертационных советов при «Истоке», одно время являлся заместителем председателя совета. Его плодотворная работа в экспертном совете ВАК позволяла «истоковским» диссертантам всегда чувствовать поддержку и покровительство. Известно теплое отношение Вилиора Павловича к аспирантуре при «Истоке», ее сотрудникам и аспирантам.

Заслуги перед страной В. П. Сазонова отмечены орденом «Знак Почета», а в канун празднования 50-летия «Истока» Указом Президента РФ ему было присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации». Событие это стало знаменательным, ибо такого высокого звания сотрудник «Истока» удостаивался впервые.

Несмотря на научный авторитет и высокое положение, в быту Вилиор Павлович оставался простым и доступным человеком. Любимым его занятием вне работы было садоводство на приусадебном участке. Здесь, как и в науке и технике, он стремился досконально разобраться во всех деталях жизни растений, чтобы получать стабильно высокие урожаи. И в том, что это ему удавалось, нет ничего удивительного. Ибо пытливый ум всегда ищет предмет исследований и, найдя, доводит его до совершенства.

В дружбе и согласии Вилиор Павлович много лет прожил с супругой Натальей Владимировной, несколько лет руководившей аспирантурой «Истока». Чета Сазоновых воспитала двух сыновей, внуков, один из которых – Михаил – закончил филиал МИРЭА и работает на «Истоке».

Вилиор Павлович Сазонов умер 5 ноября 2014 г.

Незадолго до ухода на заслуженный отдых Вилиор Павлович завершил свой фундаментальный научный труд по электровакуумным приборам СВЧ «Приоритеты России в вакуумной СВЧ-электронике в XX столетии».

«Целью настоящей работы, – отмечает во введении автор, – является объективный обзор достижений российских ученых и разработчиков в области создания вакуумных микроволновых приборов».

«Настоящая книга является обзором работ, выполненных в головном российском институте микроволновой электроники «Истоке», а также наиболее существенных работ, выполненных в институтах Академии наук РФ, в высших учебных заведениях, на промышленных предприятиях России и за рубежом… В своей работе автор опирается как на широко известные работы, так и на малоизвестные открытые публикации. В связи с этим книга может представлять интерес как для российского, так и зарубежного читателя», – пишет в предисловии научный редактор книги лауреат Государственной премии Российской Федерации, доктор технических наук, профессор А. Н. Королев.

Побудительным мотивом к написанию книги явилось существенное различие в понятии о приоритете в нашей стране и за рубежом. В США «первенство в предложении какого-либо прибора, устройства, материала и т. д. подтверждается только выдачей патента. Все остальные документы: статьи, доклады, книги, публичные выступления – являются лишь литературными высказываниями и прямой юридической силы в подтверждении приоритета не имеют». Указанные обстоятельства дали повод автору описать приоритетные работы российских авторов, основываясь на пионерных статьях и докладах советских ученых и на авторских свидетельствах СССР на изобретения, которые в США не имеют юридической силы.

«Прародительницей всех электровакуумных приборов, – пишет автор, – является лампа накаливания, предназначенная для освещения, которую разработали выдающийся русский электротехник А. Н. Лодыгин (1873 г.) и широко известный американский изобретатель Т. А. Эдисон (1879 г.). В 1905 году английский ученый Д. А. Флеминг изобрел электровакуумный диод, а в 1906-м американский инженер Ли Де Форест – электровакуумный триод. К концу

30-х годов прошлого века был создан целый ряд приемоусилительных и генераторных ламп с управляющими металлическими сетками.

Наиболее удачную конструкцию триода в 1938 – 1939 годах предложил и осуществил на практике Н. Д. Девятков. Лампа Н. Д. Девяткова явилась прообразом многочисленных конструкций триодов, выпускавшихся с 1941 по 1954 г. в США, Англии, Германии.

В 1932 г. ленинградский профессор Д. А. Рожанский впервые предложил вместо сеток использовать электрическое поле для управления электронным потоком. Эти работы легли в основу создания различных типов электровакуумных приборов СВЧ: клистронов, магнетронов, ламп бегущей волны (ЛБВ), ламп обратной волны (ЛОВ) и т. д.

Используя исключительно документальные материалы и описания изобретений, В. П. Сазонов, в частности, доказывает, что приоритет изобретения отражательного клистрона принадлежит сотруднику «Истока» В. Ф. Коваленко. Ему же принадлежат идеи многолучевых клистронов на основном и высших типах колебаний. В 1958 г. на «Истоке» С. А. Зусмановским была предпринята первая и весьма удачная попытка разработки мощного шестилучевого клистрона на высшем типе колебаний. Эти работы в дальнейшем с большим успехом развил истоковец, начальник отдела С. В. Королев с сотрудниками.

Первый в мире мощный магнетрон был создан ленинградскими учеными Н. Ф. Алексеевым и Д. Е. Маляровым под руководством профессора М. А. Бонч-Бруевича. В начале 60-х годов на «Истоке» А. П. Федосеев впервые предложил и использовал многоэтажную конструкцию магнетронного резонатора. Кроме этих работ, «Истоку» принадлежит приоритет в разработке миниатюрных синхронизированных магнетронов.

ЛБВ в том современном виде, в каком она известна сейчас, никем не патентовалась. Л. А. Вайнштейном была впервые опубликована серия статей по нелинейной теории ЛБВ. Первые промышленные образцы ЛБВ были созданы на «Истоке» под руководством В. А. Афанасьева (впоследствии Героем Социалистического Труда). «Истоку» принадлежит приоритет в создании «прозрачных» многолучевых ЛБВ (Б. В. Сазонов, А. С. Победоносцев)».

Приведенные примеры – лишь небольшая иллюстрация выполненной профессором В. П. Сановым огромной работы по исследованию приоритетов советских и российских ученых, изложенной им на 350 страницах. Книга содержит богатый материал, позволяющий досконально разобраться в преимуществах того или иного изобретения. Читается она на одном дыхании. И это не удивительно – в истории науки и техники практически любое основополагающее изобретение связано с увлекательной предысторией, борьбой идей и судеб.

Привлекательным в книге является и наличие основательной библиографии, содержащей помимо известных литературных источников редкие публикации. Все они детально проработаны автором, научные идеи в книге излагаются на простом и доступным языке.

Книга В. П. Сазонова – редкое явление в современной научной литературе. Она гармонично сочетает в себе известную триаду величия произведения: документальную достоверность, глубокий анализ физических и технических идей и простоту изложения.

БОРИС ПАВЛОВИЧ НИКОНОВ

Б. П. Никонов

Ученый с мировым именем, доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР. Он входил в когорту выдающихся технологов электровакуумных приборов.

Б. П. Никонов родился в Ташкенте 18 сентября 1927 г.

В 1934 году мать с сыном и дочерью переехала в Липецк, а в 1940 году – в Москву. Борис учился в знаменитой школе № 26, в которой до революции размещалось реальное училище и на фронтоне которой запечатлены фрески Михаила Врубеля. Из примет того периода юноше запомнилось грандиозное строительство Дворца Советов на месте взорванного храма Христа Спасителя.

Начало войны разделило семью. Мать уже с тремя детьми возвратилась в Ташкент к родным. Борис, как старший в семье, вынужден был пойти работать на завод Ташсельмаш учеником токаря. Но самое главное – школу не бросил. Днем учился, в ночную смену работал. После окончания школы он вновь переехал в Москву, чтобы продолжить учебу в химико-технологическом институте имени Д. И. Менделеева (МХТИ). Учеба давалась ему легко, он успевал помогать и своим однокурсникам, в большинстве своем фронтовикам. Институт закончил с отличием.

Когда Б. П. Никонов учился на старших курсах, в институте на специальном факультете была организована кафедра по технологии электронных приборов и создано несколько групп из «подходящих» студентов. На группу старше его учились К. Г. Ноздрина и А. А. Астафьев, а следом за ним Л. А. Тимошин и Г. А. Кудинцева. Примерно в те же годы в других технологических институтах учились технологи новой волны В. Н. Батыгин, И. П. Стародубов и другие. Все они впоследствии стали ведущими специалистами «Истока» и многие лауреатами Ленинской и Государственной премий СССР.

В 1948 году по совету отца он поехал во Фрязино, где тогда только становился на ноги НИИ-160, и устроился на дипломную практику в отдел Г. А. Митлина, в лабораторию к Б. М. Цареву. Первая НИР, в которой он принимал участие, была поставлена по приказу И. В. Сталина во исполнение генеральной линии по разработке современной технологии катодов для импульсных СВЧ-приборов. Так что, когда Борис защищал диплом, не было ни малейших сомнений относительно того, где работать. Определенную роль сыграло и доброжелательное отношение к нему таких корифеев отечественной электроники, как В. С. Лукошков, С. А. Зусмановский, А. П. Федосеев.

Примерно в это же время на предприятие пришла целая группа талантливых молодых специалистов, получивших в вузах образование именно по электронике СВЧ и потому как-то сразу и всерьез заявивших о себе. Такие ученые и разработчики, как М. Б. Голант, Л. А. Парышкуро, В. Г. Кармазин, С. П. Кантюк, Ю. П. Мякиньков, сегодня известны каждому сотруднику предприятия. Именно в этот период Б. П. Никоновым были высказаны идеи, которые, по существу, он разрабатывал все последующие годы. В частности, он предложил использовать сплав никеля и кальция, который прочно вошел в жизнь и до сих пор незаменимо работает в катодах. В 1953 году Б. П. Никонов с успехом защитил кандидатскую диссертацию.

Практически сразу после защиты ему, 27-летнему молодому специалисту, предложили стать главным технологом завода. И только-только он вжился в новую для себя роль, как директор

предприятия М. М. Федоров делает ему новое предложение – поехать в Китайскую народную республику, чтобы помогать братскому народу создавать электроламповый завод.

Вернувшись из Китая, Б. П. Никонов продолжил научную работу, перейдя в только что образовавшийся «катодный» отдел 240. С 1957 года, став начальником лаборатории, насчитывающей до 50 человек, ему удалось воплотить в действительность многие свои идеи. Летопись творчества большого ученого – в его многочисленных научных статьях и книгах. Борис Павлович с сотрудниками выполнил десятки НИР и ОКР. Он автор более 30 изобретений, 60 научных статей и двух монографий: «Термоэлектронный катод» и «Оскидный катод». Из наиболее существенных результатов, вошедших в мировую практику, отметим, прежде всего, доказательство того, что за счет тонких режимов можно создать катоды из чистого никеля. Другой важный результат связан с найденной им закономерностью срока службы катода, запаса вещества и температуры, которая позволила грамотно решать вопросы надежности приборов.

Всех, кто работал с Б. П. Никоновым, всегда привлекали его подвижность и подвижничество, живость ума и характера, необычайный оптимизм и, право скажем, завидные внешние данные – стройность, подтянутость, элегантность. Изумляла и широта его творческой деятельности. В филиале МИРЭА, где он долгое время был заместителем заведующего кафедрой, имя профессора Б. П. Никонова было на устах каждого дипломника. Его требовательность вызывала у студентов и преподавателей искреннее уважение. К сожалению, годы брали свое. И Борис Павлович вынужден был проститься и с «Истоком», и с филиалом МИРЭА. Но бывшие преподаватели и студенты не забывают дорогого им профессора Никонова.

Борис Павлович Никонов ушел из жизни в 2007 г., немного не дожив до своего юбилея.

Творчество большого ученого сохраняется в его многочисленных научных статьях и книгах. А вот о детстве и юности мог поведать только он сам. Ниже мы публикуем воспоминания Б. П. Никонова, опубликованные в 2000 г. в истоковской газете «За передовую науку».

Не думаю, что мое детство во многом отличалось от детства моих сверстников. Я родился в Ташкенте. Как-то так получилось, что родители, учившиеся вместе в институте, не смогли сохранить семью и разошлись. Мама вышла замуж за другого и вместе со мной и младшей сестрой переехала в Липецк. Шел 34-й год. Отчим, я, правда, всегда называл его отцом, работал на заводе мастером, но вскоре попал на «лестницу роста». Сначала он стал начальником производства на заводе, затем – главным инженером, а в 1937 году его арестовали, судили и приговорили за вредительство к 25 годам тюрьмы за то, что при строительстве соцгорода при заводе из пяти заложенных скважин воду дали только две. Однако судьба оказалась к отцу благосклонной. Дело пересмотрели, и в 1939 году отец был освобожден.

В начале 1940 года мы переехали в Москву, жили в коммунальной комнате в добротном доме возле Новодевичьего монастыря. Я учился в знаменитой школе № 26, в которой до революции размещалось реальное училище и на фронтоне которой запечатлены фрески М. Врубеля. Школа действует и по сей день – это напротив академии им. М. Фрунзе. Из примет того периода запомнилось грандиозное строительство Дворца Советов на месте взорванного храма Христа Спасителя. Мы с мальчишками спорили – выдержит ли здание 50-метровую статую В. И. Ленина, которая должна была венчать это громадное сооружение. Надо сказать, что в нашей семье к революции и ее победам всегда относились очень возвышенно. Даже пребывание отца в тюрьме не сняло ореола этой возвышенности.

Начало войны разделило нашу семью. Отца послали работать главным инженером на Красно-

ярский завод, а мама уже с тремя детьми подалась в Ташкент к родным. Здесь мне впервые по-настоящему пришлось испытывать всю тяжесть жизни. Я, как старший в семье, вынужден был пойти работать на завод Ташсельмаш учеником токаря. Но самое главное – школу не бросил. Днем учился, в ночную смену работал. Вот здесь, думаю, и определилась вся моя судьба. Если бы тогда не выдержал и бросил школу, как делали многие мои ровесники, все дальнейшее было бы иным. Потом уже было легче. И в г. Касли, куда вместе с отцом переехала наша семья и где я, учась в девятом классе, смог подготовиться и сдать экзамен за десятилетку. И в Москве, куда я переехал в старую комнату, чтобы учиться в химико-технологическом институте им. Д. И. Менделеева (МХТИ). Финансовое обеспечение учебы взял на себя тогда мой родной отец, за что я ему чрезвычайно признателен.

Учеба давалась мне легко, я успевал помогать и своим однокурсникам, в большинстве своем фронтовикам. К тому же я был членом комитета ВЛКСМ института и спортсменом. Все шло своим чередом, и казалось, что ничто не сможет омрачить моего пребывания в институте. Но однажды на 3-м курсе во время политзанятий, которые проводил наш однокурсник, я задал ему вопрос: «Не изменилась ли позиция партии относительно окончательной победы социализма в нашей стране?» Он, конечно, ничего не ответил, но доложил кое-кому о моем вопросе. Со мной встретился член парткома института и стал расспрашивать о родителях – отец в ту пору работал главным инженером Перовского литейного завода. Затем последовала продолжительная беседа в райкоме ВЛКСМ. Я где-то дрогнул. Но, к счастью, все закончилось не столь трагично – меня вывели из комитета комсомола и объявили выговор с занесением. Попутно замечу, что этот «инцидент» нисколько не повлиял на мою учебу – институт я закончил с отличием.

Когда я учился на старших курсах, в институте на спецфакультете была организована кафедра по технологии электронных приборов. Было создано несколько групп из «подходящих» студентов. Я попал во второй набор. На группу старше меня учились К. Г. Ноздрина и Я. Г. Астафьев, а следом за мной Л. А. Тимошин и Г. А. Кудинцева. Позднее я узнал, что аналогичные преобразования прошли и в других вузах – руководителями государства был взят курс на подготовку кадров для новой области – электроники СВЧ. Примерно в те же годы в институтах учились технологи новой волны В. Н. Батыгин, И. П. Стародубов и другие.

Между тем близилось окончание учебы, шел 48-й год. У меня была возможность остаться в Москве, но отец посоветовал поехать во Фрязино, где тогда только становился на ноги НИИ-160. Мы, трое студентов, устроились на дипломную практику в отдел Г. А. Митлина, в лабораторию к Б.М. Цареву. С того времени прошло уже 50 лет, и, анализируя пройденный путь, я бы назвал своими учителями двух выдающихся ученых: по теоретическим основам знаний – Б. М. Царева, а по практической работе – немецкого доктора Рихтера. А первая НИР, в которой я принимал участие, называлась «Фосфор» и была поставлена по приказу И. В. Сталина во исполнение генеральной линии по разработке современной технологии катодов для импульсных СВЧ-приборов.

Так что, когда я защищал диплом, у меня не было ни малейших сомнений относительно того, где работать. Определенную роль сыграло и доброжелательное отношение ко мне таких корифеев отечественной электроники, как В. С. Лукошков, С. А. Зусмановский, А. П. Федосеев. Каждый из них много помогал мне в последующие годы. Отмечу и еще одно обстоятельство. Вместе со мной на предприятие пришла целая группа талантливых молодых специалистов, получивших в вузах образование именно по электронике СВЧ и потому как-то сразу и всерьез

заявивших о себе. М. Б. Голант, Л. А. Парышкуро, В. Г. Кармазин сегодня хорошо известны на предприятии. Все мы работали с таким подъемом, что сейчас это воспринимается как что-то сверхъестественное. Именно в этот период мной были высказаны идеи, которые, по существу, я разрабатывал все последующие годы.

Когда мы с М. Б. Царевым работали над катодами для импульсных приборов, то традиционно использовали в качестве основного материала никель с присадкой кремния, а для защиты от внешней среды – барий. Основной недостаток таких катодов – резкий спад тока, причина которого заключалась в образовании соединения силиката бария с высоким сопротивлением. Катоды же из чистого никеля (без кремния) были слабо активированными. Тогда я предложил для присадки использовать тот же материал, что и для покрытия. М. Б. Царев был большой эрудит и указал мне на работы, где подобная идея для ряда материалов уже исследовалась. Хуже был изучен кальций. После совместных усилий мы и металлурги получили потрясающий результат – сплав никеля и кальция, который прочно вошел в жизнь и до сих пор незаменимо работает в катодах. Совсем недавно корейские ученые очень просили передать им секреты технологии этого сплава. Я же на этом материале в 1953 году, уложившись в определенные аспирантурой сроки, с успехом защитил кандидатскую диссертацию...

Практически сразу после защиты директор опытного завода М. Х. Сергеев предложил мне стать главным технологом. Посоветовавшись с родителями, мне ведь всего-то было 27 лет, я согласился и на два года окунулся в совершенно новую для меня атмосферу. Одни документы приходилось читать и подписывать в течение целого дня. Мне же больше по душе было находиться непосредственно в цехах, решать на месте возникающие вопросы, которых на заводе всегда было очень много. Прошел хорошую жизненную школу. И только-только вжился в новую для себя роль, как вызывает директор предприятия М. М. Федоров и предлагает поехать в Китай, помогать братскому народу создавать электроламповый завод. Я сначала отказывался, но когда узнал, что во главе всей шеф-монтажной бригады поедет И. И. Каминский, согласился.

Иван Иванович Каминский был одним из первых руководителей нашего предприятия. Затем уехал в Ленинград, избирался секретарем парткома «Светланы». Любопытно, что одним из руководителей этого крупнейшего в стране предприятия был К. И. Бухарин – родной брат «любимца партии». После «ленинградского дела» И. И. Каминского избрали секретарем Выборгского райкома партии, а затем... арестовали. Как он мне рассказывал, допрашивали его практически ежедневно, требовали, чтобы он назвал сообщников. И вдруг перестали вызывать. По камерам прошел слух – умер Сталин. Дней через десять начальник тюрьмы объявил ему об освобождении. Тогда Иван Иванович стал требовать, чтобы ему сказали, за что сажали. Тюремный начальник спокойно так сказал: «Я вам искренне советую, не тратьте ни минуты – уходите прямо сейчас». Бывший секретарь парткома вернулся на «Светлану» и К. И. Бухарин, идя на определенный риск, устроил его заместителем начальника цеха. А через некоторое время ему предложили крупное дело в Китае. Внедрив хозяйственный прием, связанный с параллельным проведением различных подготовительных и пусконаладочных работ, нам удалось в короткие сроки запустить первый в КНР завод по производству «пальчиковых» ламп.

Мне особенно приятно сознавать, что в это время я работал заместителем у И. И. Каминского. Он же меня научил, вернувшись на предприятие, не мешать сложившейся там за год без меня цепочке руководителей, а продолжать научную работу. Что я и сделал, перейдя в только

что образовавшийся «катодный» отдел 240. С 1957 года, став начальником лаборатории, насчитывающей до 50 человек, мне удалось воплотить в действительность многие идеи.

Свою жизнь я разделяю на три «тайма». Первый я «играл» под руководством М. Б. Царева и частично В. С. Лукошкова. Основные решенные мною задачи были связаны с физикой работы катодов. Из наиболее существенных результатов, вошедших в мировую практику, отмечу, прежде всего, доказательство того, что поскольку кислород более летуч, чем барий, то за счет тонких режимов можно создать катоды из чистого никеля. Другой важный результат связан с найденной мной закономерностью срока службы катода, запаса вещества и температуры, которая позволила грамотно решать вопросы надежности приборов.

Во втором «тайме» я с сотрудниками своей лаборатории уже решал конструкторско-технологические задачи. Дело в том, что в 60–70-е годы на предприятии стало разрабатываться огромное число электровакуумных приборов с различными параметрами. М. Б. Голант проводил в жизнь идею миниатюризации ЭВП, Л. А. Парышкуро создавала генераторные приборы, С. А. Зусмановский, С. В. Королев и В. Г. Кармазин – приборы большой мощности, Ю. П. Мякиньков и Г. В. Ровенский вели разработки приборов с повышенным сроком службы и т. п. Поэтому и к нашим катодам предъявлялись требования миниатюрности, малого времени готовности, долговечности и другие.

Третий «тайм», который я играю сейчас, связан с дальнейшим продвижением работ по отечественным кинескопам. Я, например, уверен, что по своим потенциальным возможностям российская технология создания катодов для кинескопов цветных телевизоров не уступает зарубежной. Но для того чтобы сделать их дешевыми, нужно отлаженное массовое производство, а это сопряжено с существенными инвестициями.

ГЕОРГИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ КРЫСОВ

Г. А. Крысов

Георгий Александрович Крысов родился в 1929 году в г. Козлове (ныне Мичуринск) в семье врачей. Родители, хотя и не были учеными, оказали огромное влияние на его интерес к самостоятельному мышлению, поиску истины. Отец был хирургом, мать – детским врачом. Характерным для них было увлечение работой, любовь к ней, постоянное повышение своей квалификации. Оба зачастую работали на пределе сил. В итоге – огромное уважение к ним в городах, где жила семья, в том числе в известном городе Мичуринске.

Георгий Александрович мог бы спокойно поступить в Мичуринский плодоовощной институт, успешно его закончить и, не сомневаемся, стать столь же знаменитым ученым и в этой области. Но юношу больше тянуло к технике, причем у него рано проявилось страстное желание учиться в Московском энергетическом институте (МЭИ). МЭИ в бытность его студентом называли еще Московским экспериментальным институтом, в нем было много новых форм обучения, нового оборудования, высококвалифицированных специалистов и крупнейших в своих областях знаний преподавателей, таких, как выдающиеся ученые Н. Д. Девятков и И. В. Лебедев. Так что насто-

ящий интерес к научным исследованиям проявился у него в стенах этого уникального учебного заведения. Вместе с ним в МЭИ в одной группе учился и С. И. Ребров.

Еще в период учебы в МЭИ Георгий Александрович начал работать на кафедре, в лаборатории электронно-лучевых трубок. Затем продолжил исследования в этом же направлении в период работы над дипломным проектом – уже на «Истоке». Первыми его наставниками здесь были Н. Л. Артемьев, С. К. Темирязева и крупный немецкий специалист в области электроники Вальтер Хасс. Прежде всего он требовал от будущего инженера пунктуальности. Настоял на том, чтобы юноша проработал все основные публикации по вопросу диплома начиная с 1919 года на русском, немецком, английском и французском языках. Г. А. Крысов защитил дипломный проект на «отлично» с рекомендациями к опубликованию и здесь же, на защите, был приглашен работать на «Исток».

Работать он начал в отделе К. П. Шахова под непосредственным руководством начальника лаборатории Я. А. Юхвидина. Лаборатория занималась новым для предприятия и очень актуальным в то время делом – масс-спектроскопией. Огромную помощь в становлении молодого инженера оказал Я. А. Юхвидин, во многом своим личным примером. Работал он целеустремленно и творчески, эффективно используя глубокие свои познания в различных областях. К тому же атмосфера в лаборатории была настолько благоприятной, что при желании и стремлении к исследовательской деятельности можно было быстро расти: трудолюбие и результаты работы оценивались достойно. Георгий Александрович уже через год был назначен главным конструктором ОКР по созданию масс-спектометра. Эта работа проводилась в тесном контакте с московскими специалистами, в частности с В. Л. Тальрозе, позже членом-корреспондентом АН СССР.

Между тем на предприятии началась серьезная перестройка, связанная с созданием пальчиковых ламп серии «Анод». Г. А. Крысова в числе многих других инженеров перевели в отдел Н. В. Черепнина. Я. А. Юхвидин с сожалением отпускал из лаборатории молодого инженера. Чтобы не растерять наработанный потенциал, он предложил использовать опыт Георгия Александровича для исследования электровакуумных приборов серии «Анод», в частности для определения газового состава газотронов СГ-1П. Предложение было поддержано Н. В. Черепниным. Был разработан интересный метод изучения газовых смесей в запаянных объемах и получены важные результаты. Это была первая в мире оригинальная работа по использованию масс-спектрометров в электронике, которая впоследствии легла в основу целого научного направления, а затем и лаборатории.

Через четыре года Г. А. Крысов попал под новую перестройку. В один отдел были собраны мощные силы: В. А. Афанасьев, А. П. Федосеев и И. Е. Роговин. Георгий Александрович был переведен в лабораторию В. А. Афанасьева (впоследствии Героя Социалистического Труда), перед которым была поставлена чрезвычайно важная задача – создать сверхмалошумящие ЛБВ. Так он впервые стал заниматься непосредственно СВЧ-приборами. Им была создана сверхмалошумящая ЛБВ с кольцевым пучком и впервые в СССР были проведены ее испытания на современных самолетах на полигоне в Туркмении. Испытания полностью подтвердили все заложенные при разработке ЛБВ параметры. Эти результаты легли в основу кандидатской диссертации Г. А. Крысова.

Тем временем на предприятии начало развиваться твердотельное направление, качественный толчок которому дало открытие генерации в ЛПД А. С. Тагером, А. И. Мельниковым, А. М. Цебиевым и Г. П. Кобельковым. После назначения А. С. Тагера заместителем начальника

полупроводникового отделения он, зная работы Г. А. Крысова по масс-спектрометрии, предложил ему заняться новым направлением в технологии полупроводниковых приборов – ионной имплантацией, возникшей на стыке науки о полупроводниках и ядерной физики. Взяв за основу обычный масс-спектрометр и приделав трубку от магнетрона и генератор от краскопульта, они получили первый ускоритель на 100 кВ, способный внедрять примеси в полупроводниковые материалы. Затем с помощью конструкторов Н. Т. Островерхова, М. Н. Калинычева, А. Д. Матвеева была создана первая промышленная установка для ионной имплантации «Иола-2». Г. А. Крысов демонстрировал ее министру МЭП А. И. Шокину, который потребовал, чтобы в сжатые сроки было выпущено 25 таких установок, что и было выполнено. Позднее эти установки применялись на предприятиях страны. Удивительно, но установки «Иола-3М» до сих пор работают на «Истоке».

Чуть позже Георгий Александрович возглавил полупроводниковое отделение. В отделении трудились такие известные ученые, как А. И. Мельников, А. Д. Ходневич, Е. И. Черненко, С. А. Перегонов, И. А. Саломатин, Е. И. Блажнова, В. Б. Бердавцев, А. Г. Жуков. Нельзя было руководить отделением, не вникая в тот широкий круг вопросов, который решал каждый из них со своими коллективами. Личные же интересы Г. А. Крысова все больше склонялись к разработке методов и созданию аппаратуры для получения полупроводниковых структур, из которых затем изготавливались СВЧ-диоды и транзисторы. Поэтому после очередной реорганизации он вернулся в свою лабораторию, которая к тому времени практически целиком состояла из молодых специалистов. Для каждого из них он старался создать такие условия научного труда, чтобы увлечь молодого специалиста, сделать его работу интересной, максимально самостоятельной. Старался и последовательно осуществлял принцип коллективизма, совместно обсуждая результаты, чтобы каждый мог высказать свое мнение и тем самым участвовать в жизни лаборатории, повышать свой профессиональный уровень.

В подтверждение сказанному отметим, что группа молодых ученых лаборатории в составе Ю. П. Синькова, В. А. Гудкова, М. П. Духновского, С. Г. Трусовой и В. А. Афанасьева стала лауреатами премии Ленинского комсомола, а другая группа получила премию комсомола Подмосковья.

Другое условие его работы с молодежью – поиск новых, оригинальных решений поставленных перед ним задач. Был разработан целый ряд методов термообработки полупроводников, открыто совершенно новое направление, связанное с импульсной термообработкой. В качестве источников энергии использовались лазеры, электронные лампы-вспышки, галогенные лампы и др. Все методы были широко опробованы на различных полупроводниковых материалах: кремнии, арсениде галлия, карбиде кремния. Был изобретен способ отжига полупроводников галогенными лампами, только через полгода подобное изобретение появилось в Японии. На основе технических и технологических проработок было создано уникальное изделие типа «Импульс», которое, по сравнению с ранее применяемой аппаратурой, позволило в сотни раз снизить расход электроэнергии, в 5…10 раз уменьшить производственные площади, в десятки раз удешевить установку и увеличить производительность труда, повысив при этом качество самих полупроводниковых приборов.

Доктор технических наук Г. А. Крысов более 50 лет успешно трудился на «Истоке». За это время им выполнено много работ в различных областях электроники. Опубликованы сотни научных статей, получены десятки авторских свидетельств на изобретения. И все же, на наш взгляд, главное, чем может гордиться Георгий Александрович – им создана школа, воспитана плеяда талантливых ученых, инженеров, изобретателей.

Георгий Александрович Крысов ушел из жизни в 2017 году.

АНАТОЛИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ ЖУКОВ

А. Г. Жуков

Анатолий Григорьевич был ведущим в стране специалистом в области тепловидения, создателем уникальных быстродействующих детекторов инфракрасного диапазона длин волн, внимательным к сотрудникам и потому уважаемым начальником лаборатории.

А. Г. Жуков родился в 1930 году в г. Херсоне в простой семье. Отец был рабочим-слесарем, а мать – домохозяйкой. В школе он проявлял незаурядные способности – учился на пятёрки по всем предметам, чем доставлял большую радость родителям. Выпускник школы А. Жуков мечтал стать физиком. И хотя родители излишка средств не имели, они решили не препятствовать стремлению сына и отпустили его учиться в Киевский государственный университет (КГУ). Университет он окончил в 1954 году с красным дипломом и был распределён во Фрязино. Место распределения по всем меркам считалось хорошим: недалеко от столицы и в перспективном центре отечественной электроники.

Напутствуя выпускников, отъезжающих на фрязинское предприятие, профессор КГУ В. Е. Лашкарёв заметил, что во Фрязино заместителем руководителя предприятия по науке работает Н. Д. Девятков. Так впервые Анатолий услышал имя учёного, сыгравшего впоследствии ключевую роль в его творческой судьбе.

Первые научные шаги молодой инженер делал в известной на «Истоке» физической лаборатории Г. И. Рукмана. С увлечением постигал он теорию и технику приборов субмиллиметрового диапазона длин волн. И крайне был польщён, когда его, молодого специалиста, сам Н. Д. Девятков пригласил на одно из научных совещаний, посвященных этой тематике.

Николай Дмитриевич в те годы интересовался работами в субмиллиметровом диапазоне. Ему было известно, что А. Г. Жуков работает над созданием спектрометра в этом диапазоне, поэтому он внимательно следил за работами молодого учёного. А когда прибор был создан, лично демонстрировал его своим коллегам – видным учёным страны.

Высоко оценивая научный потенциал Анатолия Григорьевича, Н. Д. Девятков предложил ему заняться новым и несколько неожиданным для СВЧ-предприятия направлением – тепловидением. А. Г. Жуков, к тому времени сменивший в должности начальника лаборатории Г. И. Рукмана, дал согласие, правда, некоторое время его терзали сомнения, будет ли такое направление в струе работ предприятия. И хотя самостоятельную лабораторию соединили сначала с НПК-3, затем перевели в НПК-4, а потом и в НПК-25, тематику она не изменила, и работы по созданию новой, более совершенной тепловизионной аппаратуры продолжались и не прекращались еще несколько десятилетий.

Существенным прорывом в разработке тепловизоров новой модификации стало создание в НПК-4 высокочувствительного фотоэлемента на основе антимонида индия и существенное усовершенствование в НПК-3 оптико-механической системы. Участвуя непосредственно в этих работах, А. Г. Жукову с сотрудниками удалось совместить эти достижения науки и техники и создать первый в нашей стране промышленный образец быстродействующего тепловизора БТВ-1, не уступающего по своим параметрам широко распространённому в то время шведскому

тепловизору фирмы AGA. Итоги этой работы нашли также своё отражение в двух книгах по тепловидению, изданных А. Г. Жуковым совместно с А. А. Кальфа и А. Н. Горюновым.

Разработанные тепловизоры стали применяться в различных областях народного хозяйства, и прежде всего в медицине. Во Фрязинской поликлинике был организован специальный тепловизионный кабинет, ставший, по существу, первой научно-практической лабораторией по выявлению с помощью тепловизора различных онкологических заболеваний. Здесь при содействии Н. Д. Девяткова отрабатывал свои методики по диагностике рака молочной железы всемирно известный профессор С. Д. Плетнёв из Научно-онкологического института им. П.А. Герцена.

Тепловизионный кабинет работает и по сей день. По словам бывшей заведующей хирургическим отделением Фрязинской поликлиники Е. Р. Козловой, тепловизионное обследование является самым дешёвым и экспрессным методом диагностики заболеваний. Помимо медицины, тепловизоры, разработанные А. Г. Жуковым, используются в радиоэлектронике для контроля тепловых полей радиоустройств, в авиации и космонавтике для исследования распределения температуры в струе реактивного пламени и контроля качества наружной отделки летательных аппаратов; в строительстве для выявления мест утечки тепла; для тепловой аэросъёмки местности; для контроля технологических процессов в металлургии, исследования мест спаев и сварок и во многих других областях. Сегодня работы, начатые Н. Д. Девятковым и А. Г. Жуковым, выросли в целое научное направление, имеющее большую практическую ценность. Этим вопросам была посвящена докторская диссертация Анатолия Григорьевича.

Работы над совершенствованием тепловизионного оборудования продолжаются в различных НИИ и клиниках мира по сей день. Борьба с коронавирусом в мире в 2019 – 2021 годах нашла еще одно важное применение тепловизоров – для быстрого, точного и бесконтактного определения температуры у людей. На чемпионате Европы по футболу ЕВРО-2020, проходившем в 10 странах, все стадионы были оснащены современными тепловизорами.

В свободное от работы время Анатолий Григорьевич любил путешествовать. На автомашине он с семьёй объехал половину Советского Союза. Путешествия сменяла работа на огороде, которую он выполнял со знанием и любовью. Среди дачников А. Г. Жуков считался специалистом по пчеловодству – его отец занимался пчёлами и имел хорошую пасеку.

Было у Анатолия Григорьевича еще одно занятие для души – это живопись. Сам он неплохо рисовал, ценил этот вид искусства, знал много интересного о художниках и их произведениях.

А. Г. Жуков был любящим мужем, с супругой Верой Филипповной, работавшей в редакции научно-технического сборника «Электроника СВЧ», сер. 1, «СВЧ-техника», они прожили 65 лет, воспитали двух детей и внуков. Дочь Инна некоторое время работала на «Истоке». Внук закончил физический факультет МГУ, в настоящее время готовит кандидатскую диссертацию, внучка – студентка головного института МИРЭА.

Из воспоминаний о Н. Д. Девяткове

А. Г. Жуков

Напутствуя группу выпускников Киевского университета, направленных на работу на фрязинское предприятие НИИ-160 в 1954 году, наш профессор, специалист в области физики полупроводников В. Е. Лашкарев сказал, что там заместителем директора по науке работает Н. Д. Девятков – милейший человек, и мне в дальнейшем никогда не пришлось усомниться в этом определении.

Николай Дмитриевич отличается демократичностью, подлинной интеллигентностью, особой доброжелательностью к сотрудникам, исключительным вниманием к молодым специалистам. Помню еще в 50-е годы он приглашал меня, молодого специалиста физического отдела, на научные совещания по проблемным вопросам. Николай Дмитриевич, будучи инициатором крупномасштабных работ по проблеме субмиллиметрового диапазона, предложил мне принять участие в этих работах. Он постоянно интересовался моей темой, поддерживал ее и в известной степени пропагандировал ее результаты. Работу моего субмиллиметрового спектрометра Николай Дмитриевич демонстрировал академикам А. М. Прохорову, И. К. Кикоину и другим ученым.

В 60-е годы Н. Д. Девятков предложил мне заняться тепловидением. Идея мне понравилась, но у меня были сомнения, будет ли такое направление в струе работ нашего НИИ. Однако Николай Дмитриевич довольно тактично, но настойчиво (он умеет это делать) все же привлек меня к тепловизионным работам. Его аргументация была неотразимой: «медицинская электроника всегда будет в тематике института».

Николай Дмитриевич очень много сделал для развития тепловидения в институте. Помню, как при разработке одного из первых тепловизоров он настоял на использовании полупроводниковой схемотехники. Постепенно мы стали выходить на всесоюзную арену. Николай Дмитриевич неоднократно выступал на всесоюзных конференциях с докладами о наших работах как в области техники, так и в области применений тепловидения в практической медицине. Он содействовал популяризации тепловидения, внедрению его в медицинскую практику.

По инициативе Н. Д. Девяткова во фрязинской поликлинике был организован тепловизионный кабинет. Он сам разыскал необходимое помещение, занимался его обустройством, обсуждал дизайн. В результате мы имеем лучший в стране тепловизионный кабинет как по оформлению помещения, так и по составу и квалификации персонала. Николай Дмитриевич очень активно поддержал нашу инициативу написать книгу о тепловизионных приборах и согласился стать ее научным редактором. В 80-е годы книга сыграла важную роль как практическое руководство для разработчиков тепловизионной аппаратуры и для врачей, занимающихся диагностикой различных заболеваний. Бывали случаи, когда он корректно, но всегда строго, сдержанно отчитывал меня за медлительность или за неудачные решения. Он находил время интересоваться даже деталями работ.

Когда тепловизор уже был внедрен в производство на Кстовском заводе, он спрашивал меня, ввели ли мы вторую изотерму в конструкцию прибора, позволяющую повысить достоверность оценки температуры с помощью тепловизора.

Я безмерно благодарен Николаю Дмитриевичу за живой интерес к моим работам. Именно по его предложению и при его поддержке я оформил свои работы в виде докторской диссертации. Хотелось бы, чтобы новые тепловизионные проблемы, которые мы часто и подолгу обсуждали с ним, нашли свое реальное воплощение в дальнейшем развитии отечественной тепловизионной техники.

Статья поступила 4 июля 2021 г.

НОВЫЕ КНИГИ

ПЕРУНОВ, Ю. М. **Методы и средства радиоэлектронной борьбы:** монография / Ю. М. Перунов, А. И. Куприянов. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 376 с.

Рассматриваются радиоэлектронные системы и средства, функционирующие в условиях информационного противоборства, а также средства и способы радиоэлектронного подавления информационных каналов радиоэлектронных систем различной структуры и функционального назначения. Приводятся технические решения при построении средств радиоэлектронного противодействия, методы оценки эффективности средств радиоэлектронной борьбы и тенденции развития этих средств.

Для студентов и аспирантов радиотехнических специальностей. Может быть полезно специалистам в области радиоэлектронной борьбы.

ДМИТРИЕВ, В. Г. **Радиоэлектронная борьба: функциональное поражение радиоэлектронных средств:** монография / В. Г. Дмитриев. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 268 с.

Рассматриваются принципиальные возможности, технические приемы проектирования и использования средств функционального поражения одноразового и многоразового применения, оснащенных сверхвысокочастотными и сверхширокополосными импульсными генераторами.

Для специалистов в области радиоэлектронной и информационной борьбы. Издание может быть полезно студентам и аспирантам, изучающим технику радиоэлектронных систем и комплексов в вузах.

ПРАВИЛА НАПРАВЛЕНИЯ, РЕЦЕНЗИРОВАНИЯ И ОПУБЛИКОВАНИЯ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ СБОРНИКЕ «ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА», СЕРИЯ 1, «СВЧ-ТЕХНИКА»

1. Статья должна иметь официальное направление от учреждения, в котором выполнена работа, и документ, подтверждающий возможность открытого публикования (акт экспертизы).

2. Статья должна содержать:

- соответствующий индекс универсальной десятичной классификации литературы (УДК);
- инициалы и фамилии авторов;
- название;
- реферат;
- ключевые слова;
- текст самой статьи;
- список литературы;
- краткие сведения об авторах, включающие фамилию, имя, отчество (полностью), город, место работы, домашний и электронный адрес, телефон.

Объем публикуемой статьи, как правило, до 12 стр., включая иллюстрации.

3. Статья должна быть подготовлена в текстовом редакторе MS Word для Windows и передана в виде файла (формат .doc или .docs) по электронной почте, либо записанного на ФЛЭШ или оптическом (CD) носителе, и двух печатных экземпляров.

4. Форматирование статьи: одинарный межстрочный интервал, выравнивание текста по ширине, абзацный отступ – 0,7 см. При наборе текста используются только стандартные True Type шрифты – Times New Roman и Symbol. Размер шрифта основного текста – 12 пунктов, примечаний и ссылок – 10 пунктов. Устанавливаемый размер бумаги – А4 (210 × 297 мм).

Сложные формулы набираются только в «Редакторе формул» Word. Непосредственно в программе Word допускается использование только простых формул (символы с индексами, подстрочными и/или надстрочными). Не принимаются формулы, выполненные в виде рисунков. Расшифровка буквенных обозначений формул в тексте должна быть набрана в текстовом редакторе. Таблицы выполняются в формате Word.

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

- растровые рисунки – в формате TIFF, разрешение не менее 300 точек/дюйм (для полутоновых фотографий допускается формат JPEG); векторная графика – в формате CorelDRAW, WMF;
- размер рисунка – не более 17 × 20 см;
- буквенные и цифровые обозначения на рисунках должны соответствовать обозначениям в тексте, причем начертание греческих и русских букв прямое, а латинских букв и цифр, обозначающих номера позиций, – курсивное;
- текстовая информация, не являющаяся неотъемлемой частью рисунка, и условные обозначения выносятся в текст статьи или в подпись к рисунку.

Фотографии (не более 18 × 24 см) принимаются в электронном виде.

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

6. Следует строго соблюдать единообразие терминов, размерностей, условных обозначений, сокращений. Единицы измерения должны соответствовать системе СИ.

7. Формулы следует нумеровать в круглых скобках, например (2), литературные ссылки – в прямых, например [2], подстрочные замечания отмечаются звездочками *.

8. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Все слова в заголовках граф даются без сокращений и в единственном числе.

9. Библиография составляется в соответствии с ГОСТ 7.1 – 2003 и дается общим списком в конце статьи.

10. Полученная статья направляется редакцией на рецензирование ведущим специалистам в данной научно-технической области.

11. Итоговое решение об одобрении или отклонении представленных в редакцию материалов принимается редакционной коллегией на основании заключения рецензентов, о чем авторы ставятся в известность.

12. Редакция направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса. Рецензии на все опубликованные статьи хранятся в редакции издания 5 лет.

13. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2022 г. (4 вып. в год). Стоимость подписки – 9600 руб., включая НДС (20 %).

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер ПИ № ФС 77-73640 от 7 сентября 2018 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук).

Для оформления подписки необходимо произвести оплату по указанным ниже банковским реквизитам: АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОГРН 1135050007400, ИНН / КПП 5050108496 / 774550001, р/с 40702810700250010343, Банк АО АКБ «НОВИКОМБАНК», БИК 044525162, к/с 30101810245250000162 – и выслать копию платежного поручения и бланк-заказ по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, корпус 1, комната 65, этаж 2. АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОНТИ; тел.: (495)465-86-12.

Счет-фактура высылается заказчику после получения оформленных документов на подписку.

З А К А З

Прошу принять подписку на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2022 г. и направлять по адресу:

Куда _____
(почтовый индекс, адрес)
_____

Кому _____
(название организации)
_____

Заказ оплачен платежным поручением № _____ дата _____

на сумму _____ за _____ экз.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

«СВЧ-ТЕХНИКА»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Редактор Хоточкина Л.Н.
Переводчик Барабанова Л.В.
Компьютерная верстка Земскова Л.А.
Коррекция рисунков Лазарева Т.В.

Подписано к печати 15.9.2021 г. | Усл. п. л. 11,0 | Формат $60\times88^{1/8}$
Отпечатано ИП Нуралиев Э.С. | Уч.-изд. л. 11,5 | Тираж 500
г. Фрязино | Индекс 36292 | 9 статей

АО «НПП «Исток» им. Шокина» 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, д. 2а, корпус 1, комната 65, этаж 2. Тел.: (495)465-86-12
E-mail: stebunov@istokmw.ru; info@istokmw.ru

Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2021, вып. 3(550), с. 90

ISSN1990-9012

Подписной индекс 36292
в каталоге агентства «Роспечать»