



Анатолий Белоус,
член-корреспондент
НАН Беларуси, профессор,
заслуженный изобретатель
Республики Беларусь



Юлия Ушеренко,
доцент кафедры «Порошковая металлургия,
сварка и технология материалов»
Белорусского национального технического
университета, кандидат технических наук

Защита от электромагнитных излучений: инновационные решения белорусских ученых

Сложно представить современный мир без электромагнитных полей. Они окружают нас повсюду – от бытовых приборов и мобильных телефонов до сложнейших систем связи, управления и навигации, однако наряду с очевидными преимуществами породили проблему: воздействие электромагнитного излучения (ЭМИ) на организм человека и технику. Именно поэтому в последние годы во всех ведущих индустриальных странах ученые и специалисты работают над тем, чтобы минимизировать влияние низкочастотных полей на здоровье людей, обеспечить надежность бортовой электроники космических аппаратов и военной техники, защитить сложные электронные системы энергетики и управления воздушным движением. Данная тема стала одной из ключевых для мировой науки. Какое же место занимает в этой «интеллектуальной гонке» белорусская научная школа?

Речь идет о группе ученых, достаточно длительное время работающих в одной области знания, разделяющих общие взгляды на методы исследований, во главе которой, как правило, стоят лидеры, способные ставить амбициозные задачи, вести за собой других участников научного сообщества, передавать накопленный опыт молодому поколению. За последние 20 лет в нашей стране на базе ряда академических институтов, учреждений образования и отраслевых научно-технических центров Министерства промышленности сформировались несколько научных школ, удовлетворяющих всем вышеуказанным критериям и получивших международное признание. В первую очередь следует отметить БГУИР (Л.М. Лыньков), НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (В.М. Федосюк, С.С. Грабчиков) и ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющую компанию холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Приведем наиболее значимые направления исследований и результаты именно этих исследовательских центров.

Защита биологических объектов от ЭМИ с помощью экранирования

За последние десятилетия вследствие стремительного развития электротехнических, радиоэлектронных, информационных, транспортных и бытовых технологий заметно возрос уровень низкочастотных электромагнитных полей (НЧ ЭМП). В результате ухудшилась так называемая электромагнитная экология человека – состояние среды, в кото-

рой он постоянно находится. Даже ВОЗ сегодня рассматривает эту проблему как одну из приоритетных: термин «электромагнитный смог» официально включен в перечень основных видов загрязнений.

Эффект усугубляют переход на электротранспорт и активное развитие систем повышенного электропотребления в жилом секторе. В Беларуси благодаря вводу в эксплуатацию собственной АЭС появились льготные тарифы, стимулирующие переход владельцев частных домов на электроотопление. Параллельно стремительно растет сеть зарядной инфраструктуры, как и парк электромобилей – тенденция, отражающая глобальный курс на «зеленую» энергетику. Электрокары, электробусы, трамваи нового поколения – все это, безусловно, шаг в данном направлении, но вместе с тем и новый источник электромагнитной нагрузки. Аналогичная ситуация складывается в жилищном строительстве, где все чаще применяются концепции «умного» дома с множеством постоянно работающих электрических устройств.

Еще во времена СССР специалисты по производственной безопасности, медики рекомендовали гигиенический норматив уровня НЧ ЭМП для среды обитания человека не более 0,2 мкТл. Дело в том, что внешние низкочастотные ЭМП индуцируют в нашем организме такие электрические поля и «наведенные» токи, которые оказывают непосредственное (не запланированное создателями «умных» домов и электромобилей) воздействие на нашу нервную систему, мышцы и вызывают соответствующие побочные изменения в цепочках возбудимости нервных клеток в ЦНС. Постоянное (длительное)

нахождение в условиях магнитных полей с индукцией даже 0,2÷6 мкТл – существенный фактор риска возникновения сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний, астении, ослабления иммунитета и даже репродуктивных функций.

В опубликованной недавно коллективной работе белорусских ученых и специалистов промышленности [1] впервые были представлены конкретные результаты экспериментальных измерений величин магнитной составляющей индукции НЧ ЭМП в диапазоне частот 49–51 Гц на бытовых электроприборах – конвекторах, электрических и СВЧ-плитах, отопительных котлах различных фирм-изготовителей. Детальный анализ проблемы электромагнитной безопасности жилого фонда привел к неутешительным выводам: зафиксированные уровни НЧ ЭМП, генерируемых бытовым электрооборудованием на расстоянии 8–10 см, значительно выше, чем установленные нормативными документами. Например, конвектор с номинальной заявленной мощностью 2,4 кВт превышал значения ПДУ в 4–5 раз; электрическая плита (2,0 кВт) – в 7–8; СВЧ-печь (2,0 кВт) – в 13–15; отдельные экземпляры бытовых отопительных котлов мощностью 3,0 кВт – в 18–20 раз.

Не менее тревожные результаты были получены при исследовании электротранспортных средств. Уровень НЧ ЭМП в них зависит от мощности электродвигателя, компоновки узлов, материалов кузова и защитных элементов. Наибольшее превышение ПДУ магнитного поля отмечено в Tesla Model 3 с двигателем мощностью 190 кВт: в режимах «разгон со старта» (6–8 раз) и «разгон при движении» (5–6 раз).

Самый высокий уровень защиты водителя и пассажиров обеспечивается в электроавтомобилях, кузов которых выполнен из магнитного материала (сталь), электродвигатель расположен в подкапотном пространстве, а силовые кабели – в защитных коробах. Замена магнитного материала кузова на алюминий повышает уровень напряженности ЭМП в салоне.

Более 10 лет назад в работах [2–8] коллектива исследователей научной школы БГУИР были представлены инновационные для своего времени – и до сих пор актуальные – оригинальные технологии изготовления специальных защитных и поглощающих материалов для эффективной защиты биологических и технических объектов от электромагнитных излучений различной интенсивности.

В этих трудах были подробно рассмотрены особенности и физические механизмы взаимодействия ЭМИ с различными типами материалов защитных экранов (могут действовать за счет отражения, поглощения или комбинированного использования этих эффектов). Особое внимание отечественные авторы уделили перспективным влагосодержащим конструкциям защитных экранов и поглотителям электромагнитных излучений, включая гибкие экранирующие материалы с жидкостными наполнителями. Эти разработки стали важным шагом вперед в создании адаптивных и легких систем защиты, способных эффективно функционировать в широком диапазоне частот.

Отдельного упоминания заслуживают конструкции экранов, выполненные на основе машинно-вязаного полотна из волокнистых материалов, в которые инкорпорированы жидкие

растворные объемы. Такая структура позволяет создавать гибкие радиопоглощающие и имитационные материалы с коэффициентом отражения до –25 дБ и эффективностью 10–70 дБ в широком диапазоне частот – от 0,1 МГц до 118 ГГц.

Изготовление действительно эффективного защитного экрана требует от разработчика не просто инженерных навыков, а глубокого понимания физики взаимодействия электромагнитного излучения с веществом. Он должен выбрать оптимальный тип материала или их композицию, спроектировать конструкцию, выполнить комплекс теоретических расчетов и обязательно подтвердить их практическими испытаниями во всем требуемом диапазоне частот.

Такой комплекс задач под силу лишь сильной научной школе, объединяющей специалистов разных направлений – от физики твердого тела и материаловедения до радиотехники и прикладной электродинамики. Сегодня можно с уверенностью сказать, что в нашей стране такая школа организована и успешно развивается, опираясь как на потенциал ведущих университетов (в первую очередь БГУИР), так и на научные институты НАН Беларуси. Известно несколько десятков специально разработанных материалов, используемых белорусскими специалистами для создания различных типов защитных экранов: гомо- и гетерогенных, пористых, дисперсных, многослойных, композитных, волокнистых и др.

В качестве конкретного примера можно привести теоретические и прикладные исследования специалистов ГНПЦ НАН Беларуси по материаловедению, направленные на повышение

эффективности защиты человека от низкочастотных электромагнитных полей. Ученые изобрели многослойные пленочные экраны, в которых использованы материалы $Ni_{80}Fe_{20}/Cu$ и АМАГ172. Эксперименты показали, что такие системы способны значительно снижать уровень воздействия НЧ ЭМП, создаваемых электротранспортом и бытовыми приборами, на биологические объекты. По своим параметрам они приближаются к гигиеническим нормативам, рекомендованным медиками, что делает их перспективной основой для разработки персональных и бытовых средств защиты.

Следует отметить и значительные успехи белорусских ученых в области защиты технических объектов промышленного, космического и военного назначения от воздействия электромагнитных излучений и квазистационарных магнитных полей.

Защита от ЭМИ систем вооружений и военной техники

Актуальность указанной проблемы несколько неожиданно – даже для военных экспертов и аналитиков всего мира – вышла на первый план в связи с принципиальными и необратимыми изменениями самого характера современных военных конфликтов. Наряду с усилением позиций автономных (беспилотных) летательных, надводных и подводных аппаратов и средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) мы наблюдаем развитие относительно нового вида вооружений – так называемого электромагнитного оружия (ЭМО) – и его все возрастающей роли в информационно-технических войнах XXI в. [9, 10].

ЭМО – общее название комплекса программно-аппаратных и технических средств, предназначенных для воздействия на технические объекты, инфраструктуру и информационные системы противодействующей стороны. Массовое применение этого оружия может нарушить функционирование информационно-телекоммуникационных сетей, частично или полностью парализовать гражданские и военные системы управления и жизненно важные производства противника, что значительно снизит его боеготовность и эффективность проведения боевых операций. Последствия подобных атак могут оказаться катастрофическими, поскольку современная цивилизация в буквальном смысле зависит от устойчивости электронных и информационных потоков.

Высокая оценка военными специалистами ЭМО как одного из наиболее эффективных средств ведения современной войны объясняется именно этой зависимостью. Нарушение функционирования любой системы, обеспечивающей передачу и обработку данных, – от банковских сетей до ПВО – неминуемо приведет к дезорганизации управления и потере контроля над ситуацией.

При планировании и ведении современных боевых операций объектами воздействия ЭМО становятся не только отдельные единицы вооружения и военной техники и БПЛА, но и практически все известные системы командования, управления, разведки и связи: поражение этих средств приводит к дезинтеграции информационных и управляющих систем, резкому снижению эффективности или даже полному нарушению работы

систем связи, ПВО и ПРО. Поэтому современные разработчики радиоэлектронной аппаратуры как специального, так и гражданского назначения еще на этапе проектирования должны использовать специальные средства и методы защиты от поражающих факторов ЭМИ.

Рассмотрению физических механизмов воздействия и разработке методов защиты радиоэлектронной аппаратуры от электромагнитного оружия посвящено множество публикаций в соответствующих зарубежных научных периодических изданиях. Принцип действия практически всех известных из открытых источников информации разновидностей ЭМО основан на формировании кратковременного (импульсного) электромагнитного излучения большой мощности, способного частично или полностью «вывести из строя» радиоэлектронные приборы, составляющие основу любой информационно-коммуникационной системы, поскольку элементная база всех подобных современных устройств (диоды, транзисторы, микросхемы) весьма чувствительна как к энергетическим перегрузкам, так и к различного рода электромагнитным помехам.

Показательно, что в ставшем недавно известным СМИ официальном документе правительства США «Стратегия развития электромагнитного оружия: от “Electronic Warfare” к “Electromagnetic Warfare”» (от войны электронной к войне электромагнитной) представлены основные положения стратегии обеспечения мирового лидерства США в электромагнитном спектре, детально описана связь специальных (военных) операций в нем с законами нового вида

войн – электромагнитной войной, причем в отдельный раздел документа вынесены вопросы организации оперативной взаимосвязи между кибероперациями и операциями электромагнитной войны.

Методы повышения устойчивости радиоэлектронных средств к воздействию ЭМИ

Для эффективной защиты радиоэлектронных средств (радиолокационных станций, систем связи, средств РЭБ) и электронной аппаратуры систем вооружения и военной техники от поражения ЭМИ (в первую очередь это относится к СВЧ-излучениям) конструкторы всего мира используют множество технических решений, большинство которых по понятным причинам не публикуются в открытой печати, являясь желанными целями научно-технических подразделений разведок всех индустриальных стран.

Анализ зарубежных работ показывает 2 главных направления изысканий: выявление и купирование наиболее критических путей проникновения СВЧ-излучений в РЭА и изучение основных механизмов проникновения. Последнее необходимо для создания эффективных технических решений по подавлению таких механизмов или сведению к минимуму последствий их воздействия на электронную компонентную базу (диоды, микросхемы, функциональные модули и т.п.).

В цикле работ [11] белорусских ученых были представлены результаты как собственных теоретических исследований, так и

изучения систематизированного отечественного и мирового опыта по комплексу проблем, связанных с обеспечением защиты РЭА от различных видов излучений. Часть этих трудов, замеченная зарубежными экспертами, через год с разрешения авторов была переведена на английский и китайский языки [12–17]. Если на момент их написания пути проникновения СВЧ-излучения в РЭА были достаточно хорошо известны, то механизмы проникновения недостаточно глубоко исследованы. Например, было установлено, что СВЧ-излучение может попадать в аппаратуру через антенно-фидерные устройства, щели, отверстия и стыки в корпусах, открытые разъемы, а также непосредственно воздействовать через радиопрозрачные (пластиковые) элементы конструкции.

Прохождение таких лучей в отверстия, щели и стыки корпуса – явление достаточно сложное для физико-математического анализа, однако результаты экспериментальных исследований эффектов проникновения СВЧ-излучения через отверстия показали, что максимум его проникающей способности наблюдается при соблюдении резонансных условий, то есть в том случае, когда размеры отверстий кратны длине волны излучения. Проникающая способность резко уменьшается на волнах длиннее резонансной волны отверстия, но иногда наблюдаются опасные небольшие случайные пики на резонансных длинах волн отдельных проводников, находящихся внутри корпуса. На волнах короче резонансной длины волны отверстия наблюдается более медленный спад проникающей способности, но при этом появляются острые резонансы

благодаря множеству типов колебаний в объеме корпуса. Все подобные эффекты конструкторы аппаратуры обязательно должны учитывать уже на стадии эскизного технического проекта разрабатываемого устройства.

Поскольку проникновение СВЧ-излучения через разъемы и кабельные соединения объектов авиационно-космической техники может привести к выходу из строя бортовой РЭА и других внутренних элементов, в указанных работах были изложены методики, основные принципы и методы повышения их устойчивости. В частности, приведены практические рекомендации по организации зонального экранирования и апробированные на практике комплексные решения по защите промышленных и энергетических объектов.

Все известные ранее «классические» способы усиления устойчивости аппаратуры к воздействию ЭМИ условно можно было разделить на 3 большие группы:

- *конструкционные (экранирование, зонирование, заземление);*
- *схемотехнические (ограничение электромагнитных помех по спектру и амплитуде);*
- *функционально-алгоритмические (системы модуляции, кодирования, коррекции).*

Белорусские ученые предложили ряд инновационных (ранее неизвестных) способов предохранения электронных устройств от электромагнитных излучений, названных ими «конструктивно-технологическими» и основанных на ослаблении хорошо известного специалистам так называемого эффекта электромагнитной интерференции, который является одной из главных причин неустойчивой

работы многих систем. В частности, необходимо предотвращать условия появления в отдельных элементах и блоках «токов утечки», которые создают электромагнитные помехи для других частей электрической схемы устройства. Были предложены 2 основных подхода к уменьшению такого «наведенного» электромагнитного излучения и защите от него. Первый подразумевает защиту на уровне базовой (материнской) печатной платы специальными конструктивно-схемотехническими приемами. Второй предполагает использование специальных защитных элементов и материалов, таких как фильтры, уплотнители, защитные экраны (BLS – board level shielding), которые «надеваются» на корпус микроэлемента. Показано, что степень ослабления электромагнитного излучения зависит от электрических и физических свойств такой преграды: диэлектрической проницаемости, проводимости, толщины, частоты электромагнитного излучения, а также от расстояния между источником излучения и защитной преградой. Повышенный интерес у отечественных и зарубежных специалистов вызвало отдельное направление исследований, посвященных углубленному рассмотрению физической природы и практических рекомендаций по решению проблемы эффективной защиты от кондуктивных помех. При высокой частоте последние теоретически могут быть отнесены к аperiodическим и колебательным переходным процессам. Это наиболее часто встречающийся тип помех, распространяющихся в проводящей среде (по проводам, проводящим поверхностям, то есть контактным способом).

Специальные методы проектирования

Конструирование помехозащищенных (помехоустойчивых) электронных устройств (микросхем, печатных плат, функциональных модулей), предназначенных для работы в условиях воздействия ЭМИ различной интенсивности, значительно отличается по сложности от стандартных способов создания микросхем для коммерческого, промышленного и бытового применения.

В предельно упрощенном виде разработчику надо решить следующую задачу. Допустим, в конструкции данного электронного блока уже предусмотрена защита от ЭМИ с помощью одного из вышерассмотренных защитных (отражающих или поглощающих) экранов, который отражает (поглощает) от 70 до 90% излученной энергии. Однако любой такой блок связан по входам и выходам с другими электронными блоками, информационными и исполнительными устройствами, поэтому через антенно-фидерные системы, щели, отверстия и стыки в корпусах аппаратуры, открытые разъемы внутрь блока будут попадать оставшиеся 10–30% ЭМИ. Задача разработчика помехоустойчивых микросхем (плат, модулей) – спроектировать изделие таким образом, чтобы эти излучения как можно меньше влияли на значения электрических, статических и динамических параметров базовых транзисторов микросхем.

В цикле работ [18–20] белорусских ученых рассмотрены наиболее эффективные и апробированные на практике конструктивно-схемотехнические методы защиты электронных устройств от воздействия различных видов

электромагнитных излучений, основанные на принципах обеспечения их электромагнитной совместимости (ЭМС). В общем случае под этим термином понимается способность оборудования не только удовлетворительно функционировать в условиях электромагнитного воздействия со стороны окружающей среды, но и не оказывать недопустимого влияния на эту среду, которая может включать в себя и другое электро- и радиооборудование.

Основные понятия электромагнитной совместимости фокусируют внимание на воздействии как излучаемых, так и кондуктивных помех (так называемых наводок), распространяющихся по проводникам (наводки по цепям питания и т.п.), а также чувствительности электронного оборудования к воздействию помех (помехоустойчивость, помехозащищенность), коих существует великое множество. Показано, что при проектировании сложных электронных устройств необходимо предусматривать специальные меры противодействия буквально каждому из этих видов помех, поскольку в противном случае не гарантируется надежность функционирования устройства в реальных условиях его эксплуатации.

В научных трудах [12–17] была детально проанализирована физическая природа электромагнитных помех, систематизированы основные требования норм и стандартов электромагнитной совместимости, классификация основных типов таких помех, а также наиболее эффективные, проверенные многолетней практикой схемотехнические методы снижения уровней помех, генерируемых самими микросхемами на платах электронных узлов и модулей, и многое другое.

Особое место в работах отечественных ученых занимает выявление важных для практического применения особенностей проектирования топологии и конструкции печатных плат для высокоскоростных (высокочастотных) электронных устройств. Теоретическая основа этих исследований базируется на двух понятиях: целостность сигнала и интермодуляционные искажения.

Целостность сигнала – предмет изучения относительно новой области исследований, занимающей промежуточное положение между цифровым проектированием и теорией построения аналоговых схем. В ней рассматриваются, например, паразитные затухающие колебания («звон»), перекрестные помехи, нестабильность земли и шумы источников питания. Также ведется поиск того, как спроектировать действительно быстродействующее цифровое оборудование, которое реально работает в условиях воздействия как внешних, так и внутренних помех. Можно сказать, что понятие целостности сигнала относится к небольшой, но важной области обеспечения электромагнитной совместимости. В некотором смысле это более абстрактное понятие, чем хорошо известные предыдущим поколениям студентов-электронщиков классические законы электродинамики. Хотя с непрерывным увеличением быстродействия микросхем инженеры вынуждены уделять все больше внимания проблемам ЭМС, разработчики цифровых устройств обычно не особенно сведущи в аналоговых или высокочастотных технологиях и не обременяют себя изучением фундаментальных законов электродинамики, что, разумеется, неправильно.

В упомянутых выше [12–20] (популярных в среде специалистов) работах утверждается, что для обеспечения целостности сигнала в первую очередь необходимо принимать специальные меры для уменьшения влияния перекрестных помех, затухающих колебаний, нестабильности земли и шумов источников питания.

Показано, что уровень интермодуляционных искажений (ИМИ) широкополосных сигналов микроволнового диапазона – еще один критический параметр, существенным образом влияющий на характеристики и надежность функционирования высокоскоростных устройств и

систем связи. Особое внимание уделено специфическому и наиболее «опасному» виду ИМИ – пассивной интермодуляции (ПИМ). Это явление возникает в тех узлах и конструкциях электронных устройств, которые раньше традиционно считались линейными: в подложках печатных плат, микрополосковых линиях, радиочастотных кабелях и соединителях, антенных конструкциях и даже в близко расположенных к ним устройствах. Детально рассмотрены не только причины возникновения ПИМ, но и методы ее практического измерения и наиболее эффективные способы снижения.

Интермодуляционные эффекты имеют место в электрических цепях при нелинейном преобразовании суммы колебаний нескольких частот или одного сигнала со сплошным частотным спектром. В выходной цепи такого узла, кроме «обычных» искажений в пределах полосы частот входного сигнала, возникают внеполосные мешающие комбинационные составляющие с частотами, которых не было на входе (!). Для пользователей телекоммуникационных систем это приводит к ухудшению соотношения «сигнал\шум» и заметному снижению качества связи. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Грабчиков С.С., Грабчикова Е.А., Драпезо А.П. [и др.]. Проблема защиты человека от воздействия низкочастотных электромагнитных полей в современном обществе и возможные пути ее решения // Вести Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2024. Т. 69, №2. С. 114–128.
2. Асаенок И.С., Валенко В.С., Лыньков Л.М. [и др.]. Воздействие микроволновых излучений на клетки крови человека // Медэлектроника–2002: Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии. Материалы 1-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2002. С. 68–70.
3. Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Гусинский А.В., Колбун Н.В. Влияние СПЕ-эффекта на экранирующие свойства поглотителей электромагнитного излучения // Доклады БГУИР. 2003. Т. 1, №2. С. 139–140.
4. Борботько Т.В. Геометрически неоднородные жидкостносодержащие конструкции для поглотителей электромагнитного излучения // Современные средства связи: Материалы МНТК. – Нарочь, 2001. №2 (14)/2. С. 117–119.
5. Лыньков Л.М., Борботько Т.В. Широкодиапазонные экраны энергии ЭМИ для защиты биологических объектов // Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: Материалы МНТК. – Минск, 2002. С. 70–73.
6. Лыньков Л.М., Богуш В.А., Колбун Н.В. [и др.]. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения // Доклады БГУИР. 2004. Т. 2, №5. С. 152–167.
7. Сафонова А.М., Лунева Н.К. Топопроводящие краски для защиты от ЭМИ // Поликом–2000: Сб. тр. конф. ИММС НАНБ. – Гомель, 2000. С. 172–175.
8. Лыньков Л.М., Богуш В.А., Глыбин В.П. [и др.]. Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения. – Минск, 2000.
9. Белоус А.И., Ушеренко Ю.С. Защита от электромагнитных излучений: материалы, технологии, конструкции. – М.; Вологда, 2026.
10. Roman O.V., Dybov O.A., Romanov G.S., Usherenko S.M. Damage of Integrated Circuits by High-Velocity Microparticles Penetrating Thick-Wall Obstacles // Technical Physics Letters. 2005. Vol. 31, №1. P. 46–47.
11. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Основы конструирования высокоскоростных электронных устройств: краткий курс «белой магии» / Под ред. А.И. Белоуса. – М., 2017.
12. Белоус А.И., Красников Г.Я., Солодуха В.А. Основы проектирования субмикронных микросхем. – М., 2020.
13. Belous A., Saladukha V. High-Speed Digital System Design: Art, Science and Experience. – Cham, Switzerland, Springer Nature Switzerland AG, 2020.
14. Belous A. Handbook of Microwave and Radar Engineering. – Cham, 2021.
15. Belous A., Saladukha V. Space Microelectronics. Vol. 1: Modern Spacecraft Classification, Failure and Electrical Component Requirements. – Norwood, 2018.
16. Belous A., Saladukha V. Space Microelectronics. Vol. 2: Integrated Circuit Design for Space Applications. – Boston; London, 2018.
17. Belous A., Saladukha V. The Art and Science of Microelectronic Circuit Design. – Cham, 2021.
18. Белоус А.И., Мерданов М.К., Шведов С.В. СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи. Техническая энциклопедия. В 2 кн. Кн. 1. – М., 2016.
19. Белоус А.И., Мерданов М.К., Шведов С.В. СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи: техническая энциклопедия. В 2 кн. Кн. 2. – 2-е изд., доп. – М., 2018.
20. Белоус А.И., Емельянов В.А., Турцевич А.С. Основы схемотехники микрорелектронных устройств. – М., 2012.

