

УДК 530.182

Тенденции развития сверхширокополосных прямохаотических средств связи

Дмитриев А. С., Рыжов А. И.

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
ул. Моховая, 11, корп. 7, Москва, 125009, Российская Федерация
chaos@cplire.ru*

Получено: 12 мая 2023 г.

Отрецензировано: 15 мая 2023 г.

Принято к публикации: 19 мая 2023 г.

Аннотация: *Рассматриваются тенденции развития сверхширокополосных беспроводных средств связи на основе хаотических сигналов. Впервые прямохаотические средства связи были предложены в 2000 году как способ использования шумоподобных (хаотических) сигналов для передачи информации. Идея заключалась в том, чтобы формировать несущие информацию сигналы непосредственно в области радио- или микроволновых частот, где осуществляется передача, и там же производить модуляцию и демодуляцию этих сигналов, не прибегая к операциям переноса частот. В базовом варианте схемы в качестве носителя информации использовались хаотические радиоимпульсы, что допускало возможность использования модуляции «включил — выключил» и модуляции позиций хаотических радиоимпульсов. В качестве приемника использовался, согласованный с передаваемым сигналом детектор огибающей. Другим вариантом прямохаотической системы является недавно предложенная относительная схема передачи на основе хаотических радиоимпульсов. В докладе представлены результаты исследований характеристик и специфики обеих схем при их использовании в сверхширокополосной беспроводной связи сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн.*

Ключевые слова: *хаотические радиоимпульсы, сверхширокополосная связь, энергетический прием, относительная передача.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Дмитриев А. С., Рыжов А. И. Тенденции развития сверхширокополосных прямохаотических средств связи // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 1. С. 1—14.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Дмитриев, А. С. Тенденции развития сверхширокополосных прямохаотических средств связи / А. С. Дмитриев, А. И. Рыжов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 1. — С. 1—14.

1. Введение

Явление динамического хаоса (ДХ) было открыто и активно исследовалось, начиная с середины 60-х годов XX века. За первые 20 лет этот феномен был изучен детально с примерами в различных областях естествознания. Многие свойства ДХ оказались удивительными, к ним, безусловно, относится и возможность синхронизации двух и более систем с динамическим хаосом. Именно это свойство вызвало первоначальный интерес к хаосу как к потенциальному носителю информации. И, хотя первые схемы передачи информации, предложенные на основе хаотической синхронизации, оказались недостаточно эффективными с точки зрения помехоустойчивости [1—3], начало исследованиям по использованию динамического хаоса для передачи информации было положено. В их процессе оказалось, что динамический хаос обладает целым рядом свойств, привлекательных с точки зрения передачи данных, а именно: возможность получения сложных колебаний с помощью простых по структуре электронных устройств; способность реализовывать большое количество различных хаотических мод в одном устройстве; управление хаотическими режимами путем изменения параметров системы; большая информационная емкость; разнообразие методов ввода информационного сигнала в хаотический; увеличение скорости модуляции по отношению к модуляции регулярных сигналов; возможность самосинхронизации передатчика и приемника; нетрадиционные методы мультиплексирования; конфиденциальность при передаче сообщений.

Это обстоятельство стимулировало новые усилия по поиску методов и подходов применения хаотических сигналов в коммуникациях.

Среди потенциальных кандидатов оказались относительные методы передачи [2—4] и использование энергетического приема [5—7]. Оба подхода позволяют использовать такие черты хаотических сигналов как широкополосность (сверхширокополосность), которая, в соответствии с теорией Шеннона, обеспечивает пропорциональную полосе потенциальную информационную емкость канала передачи и возможность использования расширения спектра информационного сигнала. Последнее важно для практической реализации средств связи, работающих в условиях реальных физических сред.

Вместе с тем, проведенные многочисленные исследования в области использования хаотических сигналов в качестве носителя информации для систем связи показывают значительный разрыв между потенциальными информационными возможностями систем связи на основе динамического хаоса, перечисленными выше, и их практической реализуемостью.

Так, популярная в теоретических исследованиях относительная схема передачи *DCSK* [4] для физической реализации требует линий задержки с временами порядка длительности передаваемых битов. Например, при скорости передачи 1 мбит/сек, задержка должна составлять 1 мксек. Аналогичным образом в радиосистемах можно реализовать большую задержку с помощью микроволнового кабеля, но длина такого кабеля будет около 200 м.

Фактически для беспроводных коммуникаций практически реализована в основном только прямохаотическая схема с энергетическим приемом *DCC* [5—7].

Ограниченность возможностей по практической реализации имеющихся теоретических коммуникационных схем на основе динамического хаоса сдерживает развитие хаотических коммуникаций и показывает необходимость в новых решениях, снимающих указанные ограничения.

В статье рассматривается и исследуется на устойчивость в канале с белым шумом новая относительная схема передачи информации с использованием хаоса — прямохаотическая относительная схема передачи информации (*Direct Chaotic Differential Communications — DC²*), не требующая, в отличие от *DCSK*, больших задержек при обработке сигналов, и обладающая расширенными возможностями организации многопользовательских режимов по сравнению со схемой *DCC*.

Название схемы отражает ее основные характерные черты: прямохаотическая означает, что хаотический сигнал формируется и модулируется непосредственно в области радио (или микроволновых) частот, в которой осуществляется беспроводная связь; относительная — означает, что и опорный и информационный сигналы передаются через канал связи.

В схеме *DC²*, также как и в схеме *DCC*, в качестве носителя информации используются хаотические радиоимпульсы, что позволяет регулировать процессинг информационного сигнала (степень расширения спектра) через длину импульсов и бороться с многолучевостью с использованием защитных интервалов. В прямохаотических беспроводных приемопередатчиках предполагается, чаще всего, использование широкополосных и сверхширокополосных сигналов.

В первом разделе статьи рассматриваются некогерентные схемы передачи информации с использованием динамического хаоса. Во втором разделе описывается базовая схема передачи информации на основе хаотических радиоимпульсов *DCC*. Третий раздел посвящен относительной схеме прямохаотической передачи *DC²*. Далее обсуждается помехоустойчивость прямохаотических схем, многопользовательские режимы и экспериментальная реализация. В заключении анализируются полученные результаты и возможные направления дальнейших исследований.

2. Некогерентная связь на хаотических сигналах

В конце 90-х и в начале 2000-х годов было предложено несколько схем передачи информации на основе динамического хаоса без использования хаотической синхронизации. Среди них *DCC* — *Direct Chaotic Communications* [5—7], а также идеологически близкая к *DCC* схема *COOK* — *Chaos on-off Keying* [2, 3], которая относится к системам с энергетическим приемом, а также относительные методы *DCSK* — *Differential Chaotic Shift Keying* [2—4, 11] и *CDSK* — *Correlation Delay Shift Keying* [2, 3].

По своим статистическим характеристикам упомянутые системы были близки к классическим узкополосным некогерентным системам связи.

Название прямохаотической схемы связи (*DCC*) отражает ее характерную черту: хаотический сигнал формируется и модулируется непосредственно в области радио (или микроволновых) частот, в которой осуществляется беспроводная связь.

В схеме *DCC* в качестве носителя информации используются хаотические радиоимпульсы, что позволяет регулировать процессинг информационного сигнала (степень расширения спектра) через длину импульсов и бороться с многолучевостью с использованием защитных интервалов. В прямохаотических беспроводных приемопередатчиках, как правило, используются широкополосные и сверхширокополосные сигналы. Демодуляция в *DCC* осуществляется с помощью энергетического детектора.

Формально как *DCC*, так и *DCSK* используют расширение спектра, однако из-за отсутствия копий формы сигнала на приемной стороне в них применяются зашумленные формы сигнала, передаваемого по эфиру, что приводит к ухудшению их статистических характеристик по сравнению с «истинно» когерентным приемом сигналов с расширенным спектром. Особенно это заметно при использовании сигналов с большими и очень большими коэффициентами процессинга.

Вместе с тем эффект накопления сигнала в них все же работает, что позволяет извлекать полезный сигнал даже при уровне сигнал/шум меньше нуля.

Недавно была предложена еще одна схема передачи, которую можно классифицировать как прямохаотическую схему: прямохаотическая носительная схема передачи информации (DC^2 — *Direct Chaotic Differentially Coherent*), где, как и в схеме *DCC*, в качестве носителя информации используются хаотические радиоимпульсы [10, 12—14]. Схема DC^2 с точки зрения практической реализации отличается от схемы передачи *DCSK* тем, что задержки в ней имеют существенно меньшую длительность. Ниже рассматриваются оба варианта прямохаотических схем связи,

анализируются их основные особенности и характеристики, а также вопросы, связанные с их практической реализацией.

3. Прямохаотическая схема связи с энергетическим приемником

Схемы прямохаотической связи (*DCC*) — это схемы связи на основе динамического хаоса, в которых полезная информация вводится в хаотический сигнал, генерируемый непосредственно в радио- или СВЧ-диапазоне. Именно так они определяются в исходном патенте [5].

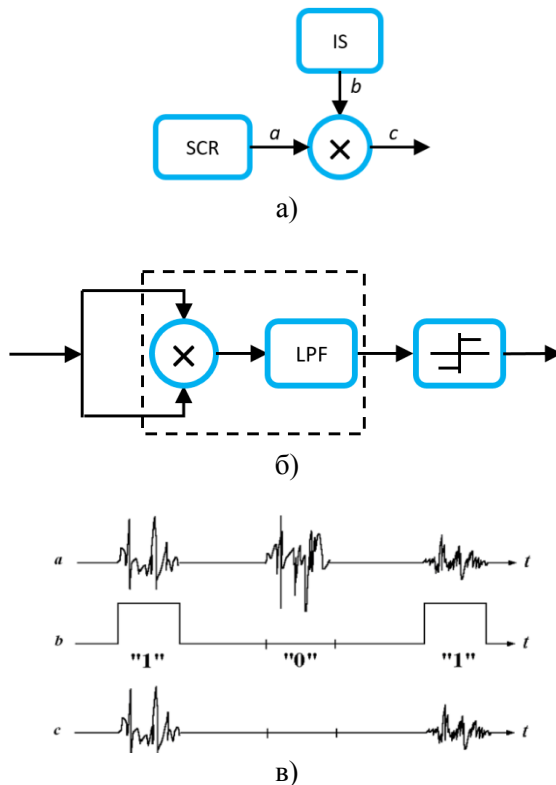


Рис. 1. Базовый вариант прямохаотической схемы связи с энергетическим приемом:
а) передатчик, где ИХР — источник хаотических радиоимпульсов, ИП — информационная последовательность; б) приемник, где ФНЧ — фильтр нижних частот;
в) форма сигнала в точках *a*, *b* и *c* передатчика.

Fig. 1. The basic version of the direct chaotic communication scheme with energy reception:
а) transmitter, where IHR is a source of chaotic radio pulses, IP is an information sequence;
б) receiver, where LPF is a low-pass filter;
в) signal shape at points *a*, *b* and *c* of the transmitter

Ключевым понятием технологии является понятие хаотического радиоимпульса. Он представляет собой фрагмент сигнала с длиной, превышающей длину квазипериода хаотических колебаний. Полоса частот хаотического радиоимпульса определяется полосой частот исходного хаотического сигнала, генерируемого источником хаоса, и в широком диапазоне изменения частот не зависит от длительности импульса. Это существенно отличает хаотический радиоимпульс от классического радиоимпульса узкополосного периодического сигнала, полоса частот которого df определяется его длиной T :

$$df = 1/T. \quad (1)$$

Базовый вариант прямохаотической схемы связи с энергетическим приемом представлен на рис. 1.

На рис. 1а показана структура передатчика схемы: источник хаотических радиоимпульсов ИХР формирует поток хаотических радиоимпульсов с защитными интервалами между ними (точка a). В варианте, представленном на рис. 1, используется модуляция «включил — выключил» (точка b) Передача «1» осуществляется при наличии на соответствующей позиции хаотического радиоимпульса; передача нуля происходит, когда импульс на позиции отсутствует (точка c). В приемнике (рис. 1б) используется энергетический прием, включающий последовательное использование квадратичного детектора, фильтра нижних частот, согласованного по частоте среза с частотой следования позиций для радиоимпульсов и порогового устройства, принимающего решение о приходе «0» или «1».

4. Относительная передача информации на основе хаотических радиоимпульсов

Хаотические радиоимпульсы, используемые в DC^2 в качестве носителей информации, имеют шумоподобные реализации и быстро спадающие функции автокорреляции. Эти ключевые свойства используются в рассматриваемой схеме относительной передачи информации. Полоса частот хаотического радиоимпульса определяется полосой частот исходного хаотического сигнала, и в широких пределах изменения длины импульса не зависит от длительности импульса.

$$\Delta T \gg \frac{1}{2\Delta F}. \quad (2)$$

Если длительность хаотического радиоимпульса $\Delta T \gg 1/2\Delta F$, то спектр мощности потока хаотических радиоимпульсов практически не бу-

дет отличаться от спектра мощности исходного хаотического сигнала. Поскольку величина $K = \Delta T \Delta F$ представляет собой коэффициент процессинга сигнала, то увеличение длины хаотического радиоимпульса приводит к увеличению его коэффициента процессинга.

Для схемы DC^2 важной характеристикой является время автокорреляции хаотического радиоимпульса, которое обратно пропорционально полосе частот хаотического сигнала $\Delta\tau \sim 1/\Delta F$. Если хаотический радиоимпульс сместить относительно себя на время большее, чем время автокорреляции, то можно эти два радиоимпульса рассматривать как некоррелированные. Эта особенность лежит в основе схемы DC^2 и используется для передачи данных.

Рассматриваемая схема передачи данных относится к относительно когерентному приёму, где, в отличие от классической схемы когерентного приёма, копия передаваемого сигнала не хранится в приёмнике, а пересылается по радиоканалу.

Для передачи данных в DC^2 в канал передается промодулированный хаотический радиоимпульс и его непромодулированная копия с задержкой между ними больше, чем время автокорреляции. При приеме производится корреляция между промодулированным радиоимпульсом и его задержанной непромодулированной копией. При модуляции для передачи логической единицы хаотический радиоимпульс передается без изменений, для передачи логического нуля хаотический радиоимпульс умножается на -1 . Таким образом, после относительного когерентного приема в приемнике возникают импульсы с положительными и отрицательными значениями. Структура схема DC^2 показана на рис. 2.

Передатчик системы (рис. 2а) состоит из источника хаотических радиоимпульсов (ИХР), делителя, модулятора, управляемого внешним информационным сигналом; задержки (τ) на время, превышающее время автокорреляции сигнала, и сумматора. Источник хаотических радиоимпульсов формирует импульсы длительностью T_u ; промежутки между импульсами — защитные интервалы — имеют длительность T_{zu} . Суммарная длительность импульса и защитного интервала представляет собой длительность передаваемого бита T_b . Каждый импульс поступает в делитель, после которого попадает в два канала. В первом канале его модулируют информационным сигналом путем умножения на ± 1 , а во втором канале задерживают на время τ . Умножение на $+1$ соответствует передаче «1», умножение на -1 — передаче «0». После этого сигналы суммируют и суммарный сигнал поступает в канал связи. При этом длина суммарного импульса равна $T_c = T_u + \tau$.

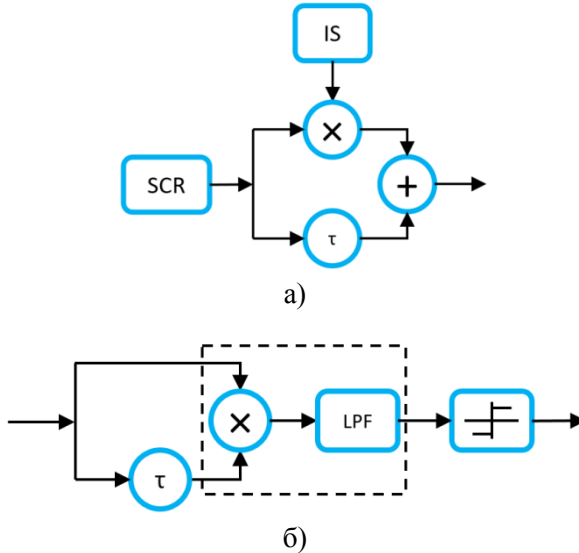


Рис. 2. Структура DC^2 схемы: а) передатчик: ИХР — источник хаотических радиоимпульсов; ИП — информационная последовательность, τ — задержка; б) приемник: τ — задержка, ФНЧ — фильтр нижних частот.

Fig. 2. The structure of the DC^2 circuit: а) transmitter: ИХР – source of chaotic radio pulses; ИП – information sequence, τ – delay; б) receiver: τ – delay, ФНЧ – low-pass filter

Приемник системы (рис. 2б) состоит из делителя, задержки на время τ , перемножителя, фильтра нижних частот (ФНЧ) и порогового устройства. Принятый антенной сигнал усиливают до нужного уровня в МШУ, делят пополам и подают в два канала. В первом канале никаких действий с сигналом не производят, и он поступает на перемножитель. Во втором канале сигнал задерживают на время τ , после чего он также поступает на перемножитель. Импульс, полученный с выхода перемножителя, пропускается через ФНЧ и поступает на пороговое устройство с нулевым порогом. Если поступивший сигнал больше нуля, то пороговое устройство фиксирует прием «1», если же он меньше нуля, то фиксируется прием «0».

5. Оценки помехоустойчивости прямохаотических схем

Аналитические оценки помехоустойчивости для относительной схемы передачи DC^2 получены в работе [10] в предположении, что к сигналу k -го символа на входе приемника добавляется флуктуационный шум с гауссовским распределением мгновенных значений и постоянной спектральной плотностью:

$$V_k(t) = Y_k(t) + \eta_k(t). \quad (3)$$

При анализе аналитической формы для вероятности ошибки было выяснено, что она обладает интересным асимптотическим свойством, а именно: при стремлении отношения сигнал/шум к бесконечности вероятность ошибки стремится не к нулю, а к некоторому пределу, равному:

$$P_{err \text{ lim}} = f\left(\sqrt{\frac{2\Delta FT_p}{5}}\right). \quad (4)$$

Статистическое численное моделирование, при помощи которого была рассчитана помехоустойчивость относительной схемы передачи информации DC^2 , осуществлялось для следующих значений коэффициента процессинга $K = 5, 10, 15, 20, 50, 100, 200, 300, 500, 10000$.

При увеличении коэффициента процессинга до $K = 50$ минимальное значение E_b/N_0 , обеспечивающее вероятность ошибки $P < 10^{-3}$, составляет 15,3 дБ (рис. 3).

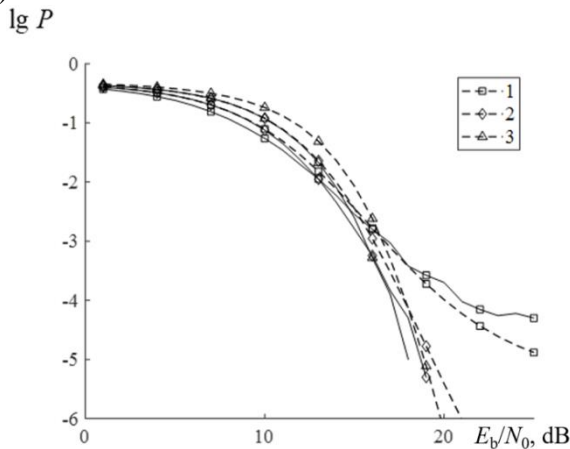
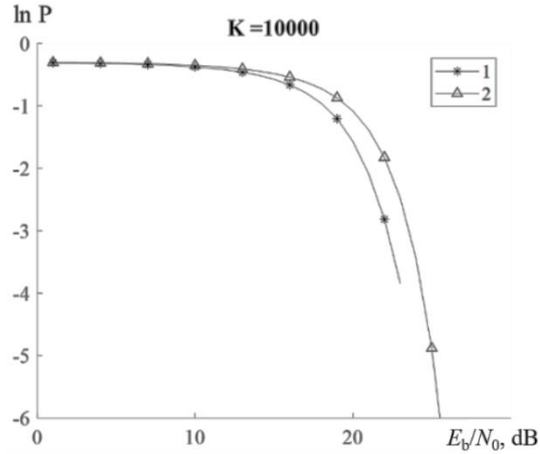


Рис. 3. Зависимости вероятности ошибки от отношения энергии бита к спектральной плотности шума при значениях $K=50; 100; 200$ (соответствуют кривым 1, 2, 3), сплошная линия соответствует экспериментальным результатам, пунктирная – аналитической оценке.

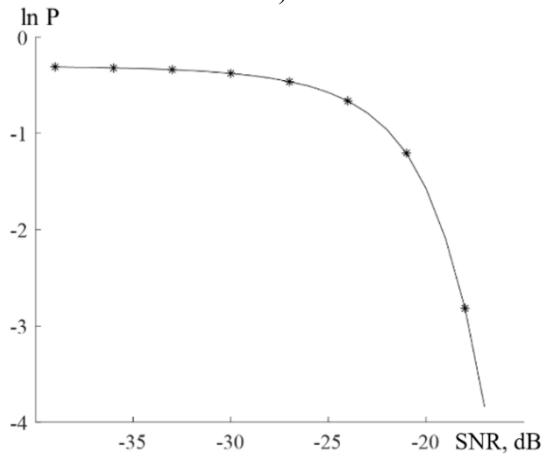
Fig. 3. Dependences of the error probability on the ratio of the bit energy to the noise spectral density for the values $K=50; 100; 200$ (corresponding to curves 1, 2, 3), the solid line corresponds to the experimental results, the dotted line corresponds to the analytical estimate

Отдельный интерес представляет исследование возможностей системы связи при очень больших коэффициентах процессинга. Так, на рис. 4 приведены результаты расчетов для коэффициента процессинга $K = 10000$. Они показывают, что система связи в этом случае может работать с вероятностью ошибки на бит 10^{-3} при уровне отношения $E_b/N_0 = 22,2$ дБ. Однако, если перейти непосредственно к зависимостям от отношения сиг-

нал/шум (C/Π — SNR) (рис. 4б), то можно видеть, что благодаря высокому коэффициенту процессинга необходимый уровень C/Π (SNR) в этом случае составляет менее -10 дБ, что говорит о том, что система связи работоспособна при уровне сигнала намного ниже уровня шумов в канале связи.



а)



б)

Рис. 4. Зависимости вероятности ошибки от: а) отношения энергии бита к спектральной плотности шума при $K=10\,000$, б) отношения уровня сигнала к уровню шума (SNR).

На рис. а) линия 1 — компьютерный расчет для гауссовского распределения, 2 — аналитическая оценка.

Fig. 4. Dependences of the error probability on: а) the ratio of the bit energy to the spectral noise density at $K=10\,000$, б) the ratio of the signal level to the noise level (SNR).

On fig. а) line 1 — computer calculation for the Gaussian distribution, 2 — analytical estimate

6. Заключение

В работе исследованы системы относительной передачи информации на основе хаотических радиоимпульсов. Изучены закономерности, связанные с использованием хаотических сигналов с различными статистическими распределениями мгновенных значений. Показано, что схема связи DC^2 работает эффективно при больших значениях коэффициента процессинга. При этом с увеличением коэффициента процессинга нивелируется зависимость помехоустойчивости от конкретного вида статистического распределения хаотического сигнала. В статье отмечается возможность реализации многопользовательских режимов [14] за счет корреляционной обработки сигналов, а также приводятся результаты первых исследований по экспериментальной реализации схемы DC^2 в дециметровом диапазоне длин волн.

Список литературы

1. Дмитриев А. С., Панас А. И. Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. М. : Физматлит, 2002. 251 с.
2. Lau F. C. M., Tse C. K. Chaos-Based Digital Communication Systems. Berlin : Heidelberg Springer-Verlag, 2003. 228 p.
3. Kaddoum G. Wireless chaos based communication systems : a comprehensive survey // IEEE Access. 2016. Vol. 4. P. 2621—2648.
4. Kolumban G., Kennedy M. P., Chua L. O. The role of synchronization in digital communications using chaos. II. Chaotic modulation and chaotic synchronization. // IEEE Trans. 1998. Vol. CS-45, no. 11. P. 1129—1140.
5. Дмитриев А. С., Панас А. И., Старков С. О. и др. Патент 2185032 (РФ). Способ передачи информации с помощью хаотических сигналов. Оpubл. в Б. И., 2002. № 19.
6. Дмитриев А. С., Кяргинский Б. Е., Панас А. И., Старков С. О. Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысокочастотном диапазоне // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46, № 2. С. 224—233.
7. Dmitriev A. S., Kyarginsky B. Ye., Panas A. I., Starkov S. O. Experiments on ultra wideband direct chaotic information transmission in microwave band // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2003. Vol. 13, no. 6. P. 1495—1507.
8. Петрович Н. Т., Размахнин М. К. Системы связи с шумоподобными сигналами. М. : Советское радио, 1969. 233 с.
9. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М. : Радио и связь, 1985. 384 с.
10. Дмитриев А. С., Мохсени Т. И., Сьерра Теран К. М. Относительная передача информации на основе хаотических радиоимпульсов // Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63, № 10. С. 1074—1082.
11. Kolumban G., Kennedy M. P., Chua L. O. The role of synchronization in digital communications using chaos. I. Fundamentals of digital communications // IEEE Trans. 1997. V. CS-44, no. 10. P. 927—936.
12. Дмитриев А. С., Ефремова Е. В., Ицков В. В., Петросян М. М., Рыжов А. И., Турканов И. Ф. Прямохаотические средства сверхширокополосной беспроводной связи в

метровом и дециметровом диапазоне радиоволн // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67, № 8. С. 797—806.

13. Дмитриев А. С., Мохсени Т. И., Петросян М. М. Экспериментальная реализация относительной схемы беспроводной передачи информации на хаотических радиоимпульсах // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48, № 18. С. 10—13.
14. Дмитриев А. С., Мохсени Т. И. Множественный доступ в системах относительной передачи информации с хаотическими радиоимпульсами // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66, № 5. С. 476—482.

Информация об авторах

Дмитриев Александр Сергеевич, д. ф. м. н., профессор, главный научный сотрудник Ин-та радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. ORCID: 0000-0003-2079-3020.

Рыжов Антон Игоревич, к. ф. м. н., старший научный сотрудник Ин-та радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН. ORCID: 0000-0001-6725-7984.

Trends in the Development of Ultra-Wideband Direct Chaotic Communications

A. S. Dmitriev and A. I. Ryzhov

*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS
Mokhovaya St., 11-7, Moscow, 299053, Russian Federation
chaos@cplire.ru*

Received: May 12, 2023

Peer-reviewed: May 15, 2023

Accepted: May 19, 2023

Abstract: *The report discusses the development trends in the development of ultra-wideband wireless communications based on chaotic signals. For the first time, direct chaotic communications were proposed in 2000 as a way to use noise-like (chaotic) signals for communication systems. The idea was to generate information-carrying signals directly in the region of radio or microwave frequencies where transmission takes place, and to modulate and demodulate these signals there without resorting to frequency transfer operations. In the basic version of the scheme, chaotic radio pulses were used as an information carrier, which made it possible to use “on-off” modulation and modulation of the positions of chaotic radio pulses. An envelope detector matched with the transmitted signal was used as a receiver. Another variant of the direct chaotic system is the recently proposed relative transmission scheme based on chaotic radio pulses. The report examines the characteristics and specifics of both schemes when used in ultra-wideband wireless communication in the centimeter and decimeter wavelength ranges.*

Keywords: *chaotic radio pulses, ultrawideband communications, energy reception, differential transmission.*

For citation (IEEE): A. S. Dmitriev and A. I. Ryzhov, “Trends in the Development of Ultra-Wideband Direct Chaotic Communications,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 1–14, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.01. (In Russ.).

References

- [1] A. S. Dmitriev and A. I. Panas, *Dynamic Chaos. Novel Type of Information Carrier for Communication Systems*. Moscow : Fizmatlit, 2002. (In Russ.).
- [2] F. C. M. Lau and C. K., *Tse Chaos-Based Digital Communication Systems*. Berlin : Heidelberg Springer-Verlag, 2003.
- [3] G. Kaddoum, “Wireless Chaos-Based Communication Systems : A Comprehensive Survey,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 2621–2648, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2572730.
- [4] G. Kolumban, M. P. Kennedy and L. O. Chua, “The role of synchronization in digital communications using chaos. II. Chaotic modulation and chaotic synchronization,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 45, no. 11, pp. 1129–1140, Nov. 1998, doi: 10.1109/81.735435.

- [5] A. S. Dmitriev, A. I. Panas, S. O. Starkov et al. “A method of transmitting information using chaotic signals,” Patent 2185032 (RF), July 27, 2000. (In Russ.).
- [6] A. S. Dmitriev, B. E. Kyarginsky, A. I. Panas, and S. O. Starkov, “Direct Chaotic Schemes for Information Transmission in the Microwave Range,” *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 46, no. 2, pp. 224–233, 2001. (In Russ.).
- [7] A. S. Dmitriev, B. Ye. Kyarginsky, A. I. Panas, and S. O. Starkov, “Experiments on Direct Chaotic Communications in Microwave Band,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 13, no. 06, pp. 1495–1507, Jun. 2003, doi: <https://doi.org/10.1142/s0218127403007345>.
- [8] Petrovich N. T., Razmakhnin M. K. *Communication systems with noise-like signals*. Moscow : Sovetskoye radio, 1969. (In Russ.).
- [9] L. E. Varakin, *Communication systems with noise-like signals*. Moscow : Radio i svyaz', 1985. (In Russ.).
- [10] A. S. Dmitriev, T. I. Mokhseni, and K. M. S. Teran, “Differentially Coherent Information Transmission Based on Chaotic Radio Pulses,” *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 63, no. 10, pp. 1183–1190, Oct. 2018, doi: <https://doi.org/10.1134/s1064226918100078>.
- [11] G. Kolumban, M. P. Kennedy, and L. O. Chua, “The role of synchronization in digital communications using chaos. I. Fundamentals of digital communications,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 44, no. 10, pp. 927–936, 1997, doi: <https://doi.org/10.1109/81.633882>.
- [12] A. S. Dmitriev, E. V. Efremova, V. V. Itskov, M. M. Petrosyan, A. I. Ryzhov, and I. F. Turkanov, “Direct-chaotic means of ultra-wideband wireless communication in the meter and decimeter range of radio waves,” *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 67, no. 8, pp. 797–806, 2022. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0033849422080046.
- [13] A. S. Dmitriev, T. I. Mokhseni, and M. M. Petrosyan, “Experimental implementation of differentially coherent wireless communication scheme based on chaotic radio pulses,” *Technical Physics Letters*, vol. 48, no. 9, pp. 45–48, 2022, doi: 10.21883/TPL.2022.09.55082.19312.
- [14] A. S. Dmitriev and T. I. Mokhseni, “Multiple Access in Relative Information Transmission Systems with Chaotic Radio Pulses,” *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 66, no. 5, pp. 599–605, May 2021, doi: <https://doi.org/10.1134/s1064226921050041>. (In Russ.).

Information about the authors

Alexander S. Dmitriev, doctor of sciences, professor, chief researcher of Kotelnikov institute of radio engineering and electronics RAS. ORCID: 0000-0003-2079-3020.

Anton I. Ryzhov, PhD, senior researcher of Kotelnikov institute of radio engineering and electronics RAS. ORCID: 0000-0001-6725-7984.

Infocommunications and Radio Technologies, vol. 6, no. 1, pp. 15–34, 2023.

Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 1. С. 15—34.

ISSN: 2587-9936

DOI: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.02

УДК 004.89/65.011.56

Модели нормального поведения каналов связи

Чикало О. В., Обухов И. А.

Научно-производственное предприятие «Радиотехника»

г. Москва, 115419, 5-й Донской проезд, д. 15, стр. 11, Российская Федерация

tchikalo@mail.ru, ia0001@mail.ru

Получено: 3 апреля 2023 г.

Отрецензировано: 15 мая 2023 г.

Принято к публикации: 19 мая 2023 г.

Аннотация: Рассмотрены модели, описывающие штатную работу каналов связи. Использование таких моделей позволяет выявить аномалии в поведении телекоммуникационного оборудования и принять меры, необходимые для поддержания его работоспособности. С этой целью анализируются «большие данные» — телеметрия, генерируемая телекоммуникационными устройствами.

Ключевые слова: предиктивная аналитика, диагностическая система, нормальное поведение, модель, мониторинг качества, интернет вещей, телекоммуникации.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Чикало О. В., Обухов И. А. Модели нормального поведения каналов связи // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 1. С. 15—34.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Чикало, О. В. Модели нормального поведения каналов связи / О. В. Чикало, И. А. Обухов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 1. — С. 15—34.

1. Введение

Одним из эффективных инструментов цифровизации экономики является «Интернет вещей» (*Internet of Things, IoT*). Развитие *IoT* провоцирует четвертую промышленную революцию, которая должна ознаменовать переходом на полностью автоматизированное цифровое производство, использованием киберфизических систем и облачных вычислений. Управлять процессами должны «умные» устройства в режиме онлайн. Примером таких умных устройств является современное телекоммуникационное оборудование, в ходе эксплуатации которого накапливается большое количество данных — различного рода телеметрия. Эти «большие данные» могут быть применены для прогнозирования возможных будущих отказов и других неисправностей (нештатных ситуаций) в самом оборудовании.

Данная статья посвящена вопросу создания моделей нормального поведения различных характеристик каналов связи, который является центральным при создании систем предиктивной диагностики.

В ходе работы канала связи обычно фиксируется большое количество статистической информации (телеметрии) о его работе. Каждая фиксируемая характеристика представляет собой временной ряд, например, последовательность измерений (подсчета) каждые n минут. Одной из проблем «больших данных», накапливаемых при эксплуатации современного связанного оборудования, является проблема рационального использования этих данных.

Одна из идей такого рационального использования состоит в том, что на основе этих данных можно оценить, работал ли канал штатно, или в его работе имели место отклонения от нормальной работы — аномалии. «Нормальность» или эталон нормального поведения должен быть сначала выражен в виде модели, которая потом и используется для оценки степени нормальности.

Термин «модель» используется условно, обычно под моделью понимается просто набор точек в многомерном пространстве. Одна точка — значения характеристики, например, за день. Таким образом, модель за месяц будет состоять из 31 точек максимум. Собирается некоторое количество характеристик за те дни, когда канал работал нормально. Данные предварительно оценивают эксперты. Затем происходит построение модели нормального поведения (МНП), т. е. среди полученных данных ищутся и отбрасываются аутлаеры (выбросы). Оставшиеся точки и формируют искомую модель. Ключевой вопрос — определить, в каком пространстве строить модель. Это пространство могут составлять исходные значения временного ряда или какие-то другие связанные с ними значения. Обычно критерием выступает плотность кластера точек, составляющих модель. Чем более плотным является кластер, тем лучше модель, тем она легче способна обнаруживать аутлаеры.

В ходе эксплуатации очередная порция телеметрии сравнивается с точками модели нормального поведения. Новая порция (точка) может находиться близко или среди имеющихся точек, что будет свидетельствовать о ее нормальности, или на некотором расстоянии от других точек. В последнем случае она может оказаться аутлаером. Существует большое количество алгоритмов для определения аутлаеров в многомерном пространстве [1]. Можно даже оценить и степень «аутлаерности» или нормальности новой точки.

Характеристики работы канала представляют собой многомерный временной ряд, если фиксируются синхронно и характеризуют разные

стороны работы канала. Поэтому следует оценивать также и нормальность всего такого временного ряда на основе своей модели нормального поведения, кроме оценки его отдельных составляющих. Отдельные характеристики могут находиться между собой в определенных соотношениях (линейных и нелинейных), например, быть коррелированными. Этот факт также следует использовать для построения соответствующих моделей, отражающих нормальное совместное поведение этих характеристик.

При получении новой порции подсчитанных (измеренных) характеристик с помощью моделей нормального поведения можно оценить, является ли вся совокупность характеристик нормальной или аномальной. Также оценивается каждая контролируемая характеристика и поведение контролируемых пар или групп характеристик. Оценку можно дать в виде трех вариантов: норма, слабый аутлаер, сильный аутлаер. Для обнаружения аутлаеров в статье используется метод *LAD_med* [2], но можно использовать и другие методы. Может возникнуть ситуация, когда каждая характеристика ведет себя нормально, а вот поведение пары (группы) или всей совокупности может быть аномальным.

Отклонение от нормы свидетельствует о возможной нештатной ситуации, имевшей место за период времени, соответствующий поступившей порции телеметрии.

В настоящей работе рассматривается построение моделей нормального поведения для характеристик каналов связи. Приводятся примеры, подтверждающие работоспособность предлагаемых моделей.

2. Данные

В качестве примера анализируемых данных мы будем рассматривать типовые характеристики канала связи, собранные с помощью аппаратно-программного комплекса *IP Quality Monitor (IQM)* [3]. Например, *SDBytes* — количество байт переданных от *Source* к *Destination*, *DSBytes* — количество байт переданных от *Destination* к *Source*, *SDLostPercent* — процент потерянных пакетов при передаче от *Source* к *Destination*, *DSLostPercent* — то же, но в обратном направлении и т. д. Полный список измеряемых характеристик приведен в таблице 1.

Таблица 1. Измеряемые характеристики, используемые для анализа.

Table 1. Measured characteristics used for analysis

Наименование характеристики	Описание характеристики
SDLost, SDLostPercent, DSLost, DSLostPercent	Потери пакетов (для URL-сессий) в обоих направлениях в абсолютных цифрах и процентах от общего.

Наименование характеристики	Описание характеристики
SDBW, SDBWPercent, DSBW, DSBWPercent	Полученная пропускная способность сети в обоих направлениях в килобитах в секунду и процентах от ожидаемой. Ожидаемой является переданная в командной строке.
SDLossBW, SDLossBWPercent, DSLossBW, DSLossBWPercent	«Потерянная» пропускная способность в обоих направлениях. Представляет собой разницу между ожидаемой пропускной способностью и полученной по итогам тестирования.
SDRemarked, SDRemarkedPercent, DSRemarked, DSRemarkedPercent	Число пакетов, доставленных с изменением класса сервиса, в абсолютных цифрах и процентах от общих полученных.
SDOOS, SDOOSPercent, DSOOS, DSOOSPercent	Число пакетов, доставленных с изменением порядка следования, в абсолютных цифрах и процентах от общих полученных.
MinRTT, AvgRTT, RMSRTT, MaxRTT	Круговая задержка доставки пакетов от инициатора до инициатора же через сопряженный канал
SDMinDelay, SDAvgDelay, SDRMSDelay, SDMaxDelay, DSMinDelay, DSAvgDelay, DSRMSDelay, DSMaxDelay	Односторонняя задержка доставки пакетов (минимальное, среднее, квадратичное, максимальное)
SDJitter, DSJitter	Дрожание задержки доставки пакетов в обоих направлениях, рассчитанное по RFC 3550
SDMinIPDV, SDAvgIPDV, SDRMSIPDV, SDMaxIPDV, DSMinIPDV, DSAvgIPDV, DSRMSIPDV, DSMaxIPDV	Дрожание задержки доставки пакетов, рассчитанное по Y.1540 (базис — минимальная задержка) за время тестовой сессии (минимальное, среднее, квадратичное, максимальное)
SDMinMAPDV2, SDAvgMAPDV2, SDRMSMAPDV2, SDMaxMAPDV2, DSMinMAPDV2, DSAvgMAPDV2, DSRMSMAPDV2, DSMaxMAPDV2	Дрожание задержки доставки пакетов, рассчитанное по G.1020 за время тестовой сессии (минимальное, среднее, квадратичное, максимальное)
SDBytes, DSBytes	Число байт, переданных в тестовой сессии в обоих направлениях

Предположим, что у нас есть данные за каждые сутки работы канала с разбивкой по пять минут. То есть каждый временной ряд имеет 288 значений (12 значений за каждый час, всего 24 часа).

3. Модели нормального поведения

3.1. Модели нормального поведения для отдельных характеристик

Моделей нормального поведения отдельной характеристики может быть множество, соответственно надо уметь выбирать лучшую. В качестве критерия предлагается выбрать количество обнаруживаемых с ее помощью аутлаеров. Модель, чувствительная к наличию аутлаеров, будет более высокого качества. Самая простая модель — использование в качестве координат в пространстве значения временного ряда характеристики. Получим 31 точку (считая в месяце 31 день) в 288-мерном пространстве.

Для наглядности будем многомерное пространство отображать на плоскость с помощью проекции Сэммона [4].

При работе с временными рядами известным приемом является использование вместо исходных значений ряда его характеристических значений — *features*. Их также существует большое множество — минимальное и максимальное значения, среднее, дисперсия и т. д. и т. п. Большой перечень таких *features* приводится, например, в работе [5]. Любое сочетание этих *features* также можно использовать в качестве МНП.

В ходе проведенных экспериментов оказалось, что желаемое качество обнаружения аутлаеров демонстрирует модель взаимной схожести, которую образуют точки в 4-мерном пространстве (координаты: три коэффициента корреляции — Кендалла, Пирсона, Спирмена, и евклидово расстояние между точками). Точка — временной ряд за день.

Определяется матрица схожести M точек друг на друга. Для этого вычисляются m_{ij} — коэффициенты корреляции между точками. Затем берется медиана по строкам. Первые три координаты отличаются только способом вычисления корреляции. Затем вычисляется четвертая координата — евклидово расстояние между исходными точками, после чего берется медиана по строкам.

3.2. Модель на основе числового шаблона

Каждая характеристика канала связи принимает значения из определенного числового диапазона. Числовой шаблон характеристики можно представить гистограммой. Количество бинов гистограммы — количество координат. Высота каждого бина (столбца гистограммы) — значение координаты. Такая модель может быть полезной, когда происходит постепенная деградация оборудования, и нужно ее вовремя обнаружить.

3.3. Модель на основе паттернов строк

Одним из способов работы с временными рядами является трансформация их в символьные строки. Один из возможных приемов трансформации представлен в таблице 2, взятой из работы [6].

Таблица 2. Пример трансформации временного ряда в символьные строки.

Table 2. Example of Time Series Transformation to Character Strings

Symbol	Meaning	Definition
a	Highly increasing transition	$\frac{d}{dt} > 5$
b	Slightly increasing transition	$5 \geq \frac{d}{dt} > 2$
c	Stable transition	$2 \geq \frac{d}{dt} > -2$
d	Slightly decreasing transition	$-2 \geq \frac{d}{dt} > -5$
e	Highly decreasing transition	$\frac{d}{dt} < -5$

Если разница между соседними значениями ряда попадает в соответствующий диапазон, числовое значение заменяется символом. Такое представление временного ряда предоставляет дополнительные возможности по сравнению с просто числовым шаблоном. Для перехода к МНП можно подсчитать, например, количество разных пар символов или троек, четверок и т. д. Каждая комбинация символов может служить координатой, а количество встречающейся конкретной комбинации — значением координаты.

3.4. Модели нормального поведения для пар характеристик

Модели на основе корреляции. Корреляция — самая известная форма линейной зависимости характеристик. Корреляция между двумя характеристиками измеряет сходство по форме между этими характеристиками. Среди характеристик канала можно найти сильно коррелированные и некоррелированные (слабо коррелированные).

Модель для сильно коррелированных характеристик. Для получения МНП достаточно измерить корреляцию между точками, как это делается в модели взаимной похожести. МНП состоит из M значений выбранного коэффициента корреляции (медиан строк матрицы).

Модели для некоррелированных характеристик (модель 2-х кластеров). Исходные значения характеристик могут образовывать явные кла-

стеры, как например, показано на рис. 1 в случаях *DSOOSPercent* (синий цвет) и *DSRMSMAPDV2* (красный цвет).

У характеристик 288 значений, используется 288-мерное пространство. Слева на рис. 1 — временные ряды этих характеристик, справа — отображение 288-мерного пространства на плоскость. Видны четкие кластеры.

Наличие таких кластеров свидетельствует об имеющих место сложных нелинейных отношениях между значениями двух характеристик. Эти отношения должны сохраняться в течение эксплуатации канала.

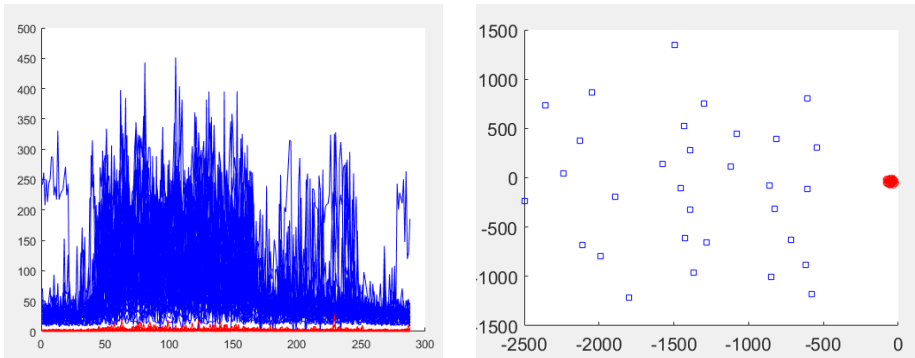


Рис. 1. *DSOOSPercent* (синий цвет) и *DSRMSMAPDV2* (красный цвет) характеристик — слева и их проекция на плоскость (проекция Сэммона) — справа.

Fig. 1. *DSOOSPercent* (blue) and *DSRMSMAPDV2* (red) characteristics (left) and their mapping to plane (Sammon projection)

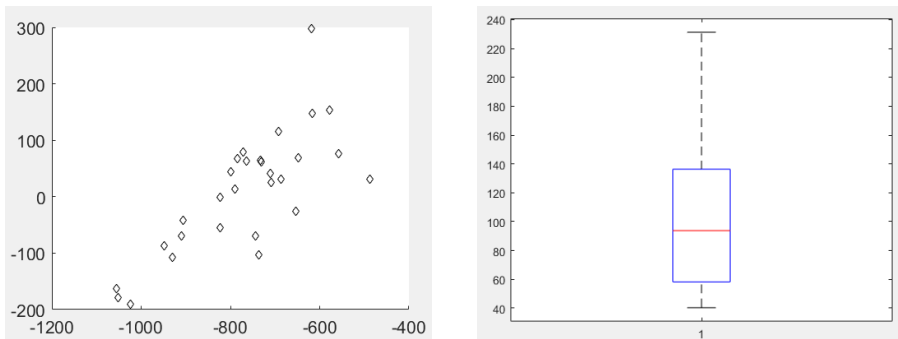


Рис. 2. Результирующая МНП и боксплот.

Fig. 2. Resulting MNB and boxplot

Для проверки сохранения этих отношений построим МНП: каждую пару точек (одна из первой характеристики за день i , вторая — из другой характеристики за этот же день) представим следующей четверкой координат:

- расстояние до медоида своего кластера, расстояние до медоида чужого кластера — для первой точки пары;
- расстояние до медоида своего кластера, расстояние до медоида чужого кластера — для второй точки пары.

На рис. 2 показана модель для пары *DSOOSPercent* и *DSRMSMAPDV2* в 4-мерном пространстве.

Естественно, точки проверяются на аутилерность. Если аутилеров нет, полученные точки сохраняем в качестве МНП.

Модель на основе расстояний между парами. Исходные значения не всех пар характеристик образуют кластеры. Например, на рис. 3 для *DSLossBW* (красный цвет) и *DSMaxMAPDV2* (синий цвет) показаны исходные значения временных рядов (слева) и отображение 288-мерного пространства на плоскость справа. Линейно разделимые кластеры отсутствуют. Характеристики не коррелированы. Для примера приведены значения трех коэффициентов корреляции для этой пары, 5 точек (дней): $-0.107, 0.038, 0.056; 0.221, 0.057, 0.089; 0.236, 0.040, 0.057; 0.221, -0.013, -0.015; 0.234, 0.094, 0.140$. Построим МНП: каждую пару представим точкой в 3-мерном пространстве коэффициентов корреляции между парами. Получим результат, показанный на рис. 4.

Модели нормального поведения многомерного временного ряда характеристик. Теоретически возможна ситуация, когда все характеристики будут демонстрировать нормальное поведение, а их совокупность — многомерный временной ряд — аномальное. Чтобы выявлять такую ситуацию, нужны специальные МНП для всего многомерного ряда.

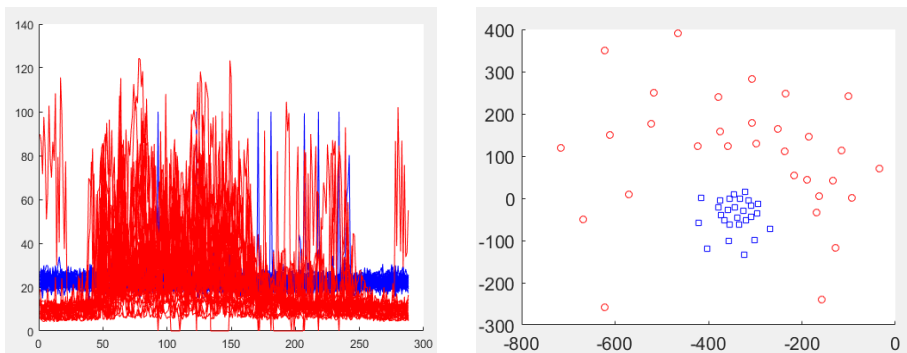


Рис. 3. *DSLossBW* (красные) и *DSMaxMAPDV2* (синие) — исходные значения временных рядов (слева) и отображение 288-мерного пространства на плоскость (справа).

Fig. 3. *DSLossBW* (red) and *DSMaxMAPDV2* (blue) – the original time series values are shown (left) and the 288-dimensional space mapping to the plane on the right

Возможно такое решение. Модель строится на основе моделей внутренней похожести отдельных характеристик. Предлагается использовать пространство:

- координата 1 — аутлаерность характеристики 1;
- координата 2 — аутлаерность характеристики 2;
- ...
- координата N — аутлаерность характеристики N .

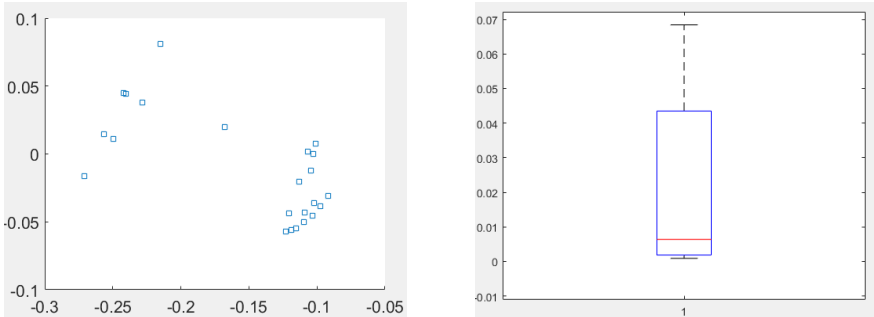


Рис. 4. Результирующая МНП и боксплот.

Fig. 4. Resulting MNB and boxplot

4. Результаты экспериментов

4.1. Модели нормального поведения для отдельных характеристик

Рассмотрим получение МНП для характеристики $DSMinMAPDV2$ на основе модели взаимной похожести. Исходные значения на графике показаны на рис. 5.

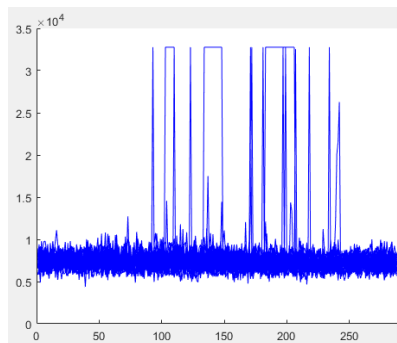


Рис. 5. График $DSMinMAPDV2$.

Fig. 5. $DSMinMAPDV2$ characteristic

Можно предположить, что все визуальные выбросы будут аутлаерами.

Для отображения многомерного пространства на плоскость используем проекцию Сэмона (рис. 6). Для обнаружения аутлаеров используем метод *LAD_med*. Аутлаеры (синие квадратики) после обнаружения удаляются. Затем процесс повторяется для оставшихся точек. Заканчивается процесс, когда аутлаеры больше не обнаруживаются.

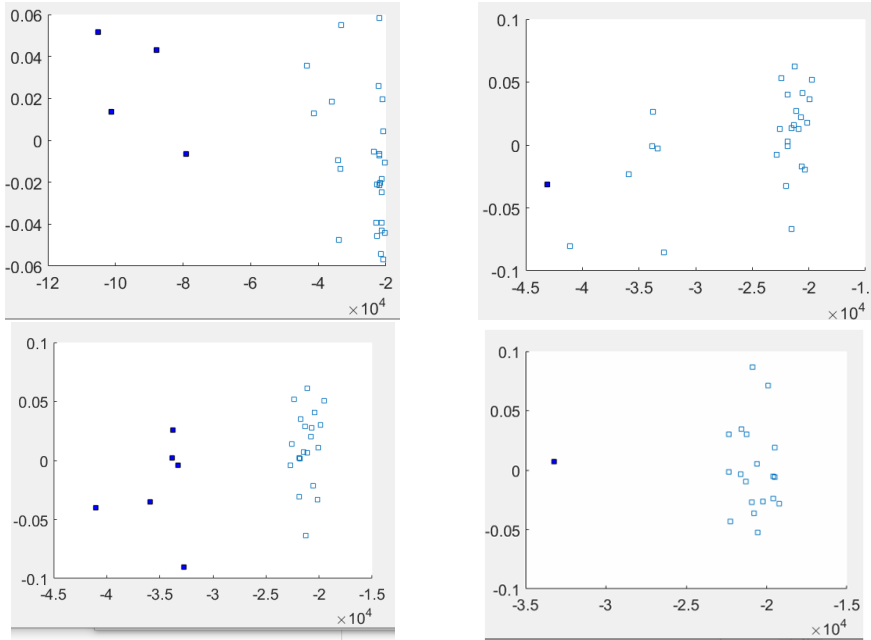


Рис. 6. Обнаружение и удаление аутлаеров.

Fig. 6. Outlier detection and removal

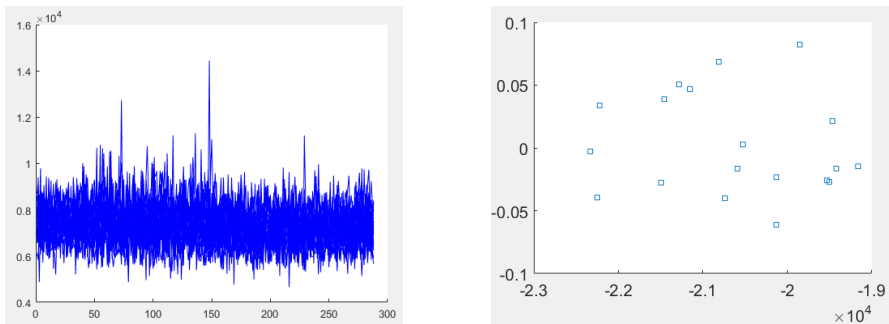


Рис. 7. *DMinMAPDV2* характеристика после удаления аутлаеров (слева) и результирующая МНП (справа).

Fig. 7. *DMinMAPDV2* characteristic after removing outliers (left) and resulting MNB (right)

На рис. 6 показано, как происходит поиск аутлаеров. Сначала найдено четыре аутлаера (отмечены как квадратики синего цвета), после их удаления найден один новый, после его удаления сразу шесть новых и, наконец, последним найден один аутлаер. Оставшиеся точки и представляют модель нормального поведения в 4-мерном пространстве, показанную на рис 7.

4.2. Модель на основе числового шаблона

Рассмотрим характеристику $DS_{avg}IPDV$, показанную на рис. 8. В качестве числового шаблона возьмем гистограмму из 100 бинов. Каждая точка имеет 100 координат, значение каждой — высота соответствующего бина.

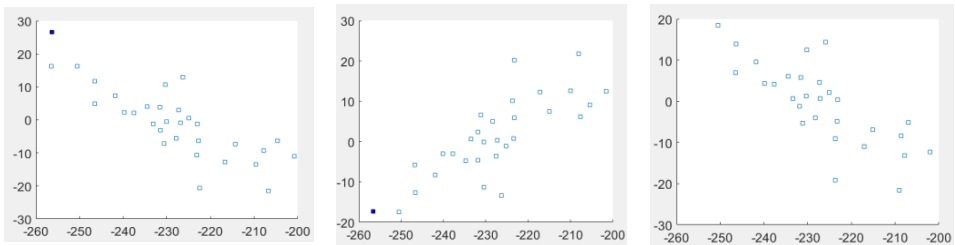


Рис. 8. Обнаружение и удаление аутлаеров.

Fig. 8. Outlier detection and removal

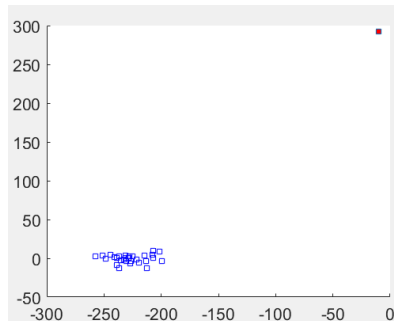


Рис. 9. Сильный аутлаер.

Fig. 9. Strong outlier

При построении МНП сначала удаляем один аутлаер, затем второй, остальные точки составляют модель нормального поведения в пространстве 100 бинов.

Если взять искусственно полученную характеристику из 288 единиц, то с помощью этой модели получим результат: красный квадрат на рис. 9. Введенная точка, сильный аутлаер, находится очень далеко от точек модели.

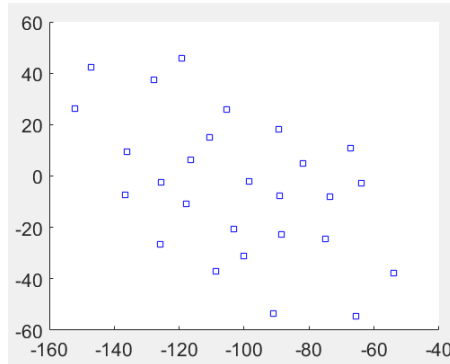


Рис. 11. Результирующая МНП.

Fig. 11. Resulting MNB

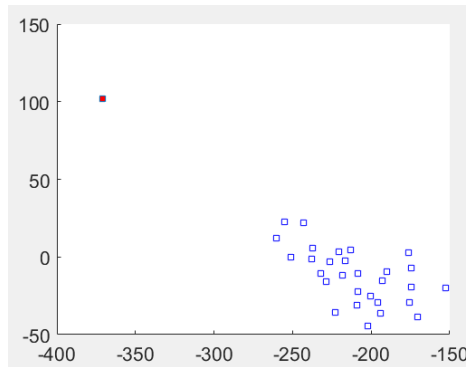


Рис. 12. Новая точка (красный квадратик) — сильный аутлаер.

Fig. 12. The new point (red square) is a strong outlier

Результат представлен на рис. 12. Видно, что выделен сильный аутлаер (красный квадратик), находящийся очень далеко от точек МНП.

4.4. Модели совместного нормального поведения для пар характеристик (модель для сильно коррелированных характеристик)

Рассмотрим характеристики $DSBW$ и $DSBWPercent$, показанные на рис. 13.

Значения коэффициентов корреляции этих характеристик близки к 1 (Кендалла, Пирсона, Спирмена) и равны соответственно:

$-0,975641458348255$ $-0,999783256671490$ $-0,997684955502735$.

В качестве модели нормального поведения сохраняем значения любого из трех коэффициентов для каждой пары — всего M значений (пред-

почтительнее использовать коэффициенты Кендалла или Спирмена из-за их непараметричности). На рис. 13 (справа) показан боксплот для коэффициента Кендалла.

При получении новых значений пары характеристик вычисляем новое значение коэффициента корреляции и сравниваем с модельными.

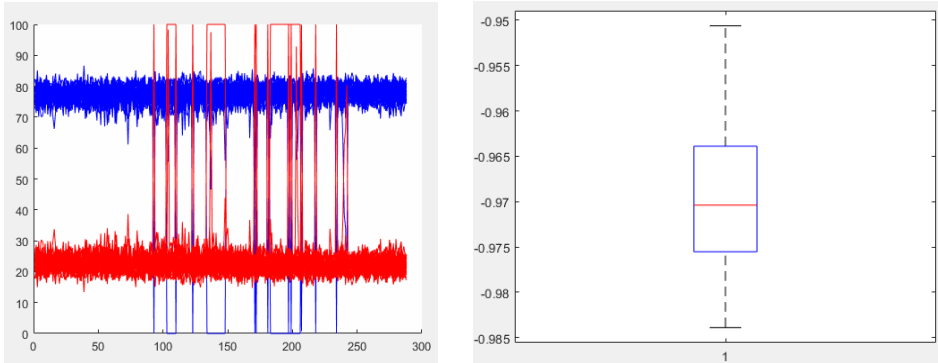


Рис. 13. *DSBW* и *DSBWPercent* характеристики (слева) и боксплот для коэффициента Кендалла (справа).

Fig. 13. *DSBW* and *DSBWPercent* characteristics (left) and boxplot for Kendall's coefficient (right)

4.5. Модели для некоррелированных характеристик (модель двух кластеров)

Мы уже построили ранее такую МНП для пары *DSOOSPercent* и *DSRMSMAPDV2*. Введем искусственную точку, которая будет в исходных данных изображаться, как показано на рис. 14.

Применим модель и получим результат, представленный на рис. 15.

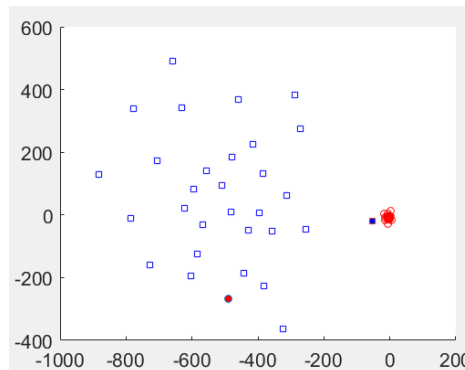


Рис. 14. Новая пара - синий квадрат и красный кружок.

Fig. 14. The new pair is a blue square and a red circle

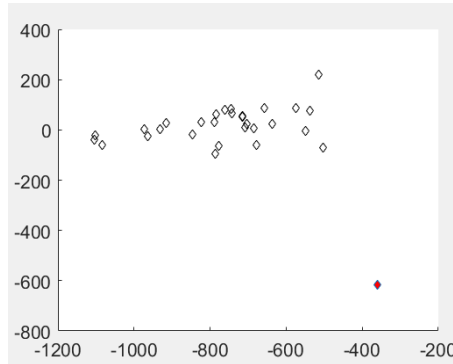


Рис. 15. Новая пара, красный ромб — сильный аутлаер.

Fig. 15. The new pair, the red diamond is a strong outlier

4.6. Модели для некоррелированных характеристик без кластеров (модель на основе расстояний между парами)

Ранее мы построили МНП для DSL_{LossBW} и $DS_{MaxMAPDV2}$. Теперь проверим модель, введя искусственную точку (коррелированные значения пары). Получим результат, представленный на рис. 16 — новую точку, сильный аутлаер.

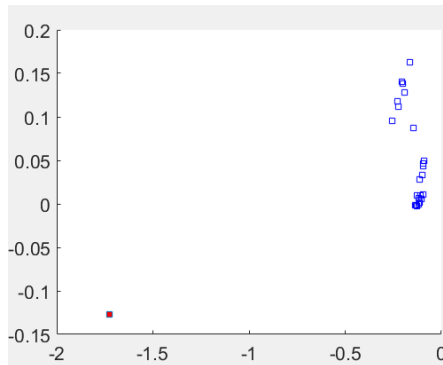


Рис. 16. Новая точка — сильный аутлаер.

Fig. 16. The new point is a strong outlier

4.7. Модели нормального поведения многомерного временного ряда характеристик

Рассмотрим пример для пяти характеристик: $DS_{MinIPDV}$, $DS_{MinMAPDV2}$, $DS_{OOSPercent}$, $DS_{RemarkedPercent}$ и $DS_{RMSMAPDV2}$.

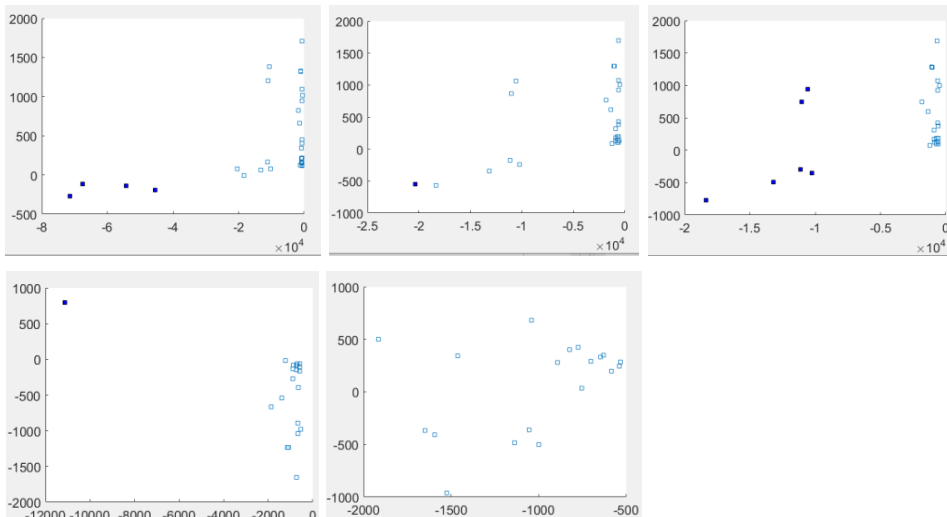


Рис. 17. Пример выделения и удаления аутлаеров в многомерном временном ряду.

Fig. 17. An example of outlier detection and removal for a multivariate time series

Удаление аутлаеров производится постепенно, как показано на рис. 17 (слева направо). В итоге были удалены 12 точек (данные за 12 дней). Остальные точки в выбранном пространстве формируют модель нормального поведения многомерного временного ряда характеристик, представленную на последнем рисунке.

5. Обсуждение

Выше были рассмотрены примеры построения моделей нормального поведения для оценки качества работы канала связи. Безусловно, их список далеко не полный, однако представленные МНП могут служить основой для построения автоматизированной системы предиктивной диагностики. Представим, что характеристики обрабатываются порциями, т. е. не в реальном времени, а после накопления определенного количества за устанавливаемый период времени, в рассмотренном примере этот период равнялся суткам.

После этого делается прогноз состояния контролируемого оборудования на следующий период сбора телеметрии. Если делается вывод об опасности дальнейшей эксплуатации, принимается решение о проведении обследования и, при необходимости, ремонта.

Предусматривается получение суммарной оценки аномальности очередной порции телеметрии для экземпляра устройства.

Это можно сделать, например, используя процедуру, представленную на рис. 18.

Каждая характеристика оценивается с помощью нескольких МНП. Если МНП показывает, что характеристика в норме, это соответствует, например, оценке в 0 баллов, слабый аутлаер — 1 балл, сильный — 2 балла. Сумма по всем МНП с учетом весовых коэффициентов моделей дает оценку нормальности характеристики, в идеале — 0 баллов.

Затем можно получить подобным же образом суммарную оценку всех характеристик, групп характеристик и всего многомерного ряда в целом.

Полученные оценки сохраняются и могут быть отображены графически для наглядности динамики их изменения. Решение о реальной опасности текущей ситуации принимает человек. Для помощи в принятии решений опытным путем устанавливаются численные пороги аномальности для каждого устройства.

Суммарная оценка аномальности работы устройства может служить индексом «здоровья системы».

Недостатком работы такой системы предиктивной диагностики является то, что она выявляет только аномалии, а не конкретные неисправности (нештатные ситуации). Но зато может предупредить о наличии проблем с оборудованием задолго до того, как оборудование выйдет из строя.

Описание выявленных после обнаружения аномалий неисправностей (сбоев) в работе устройств вместе с формальным описанием аномалий конкретных характеристик можно сохранить в базе знаний. В дальнейшем они используются как при ручном поиске аналогов, так и автоматически при обнаружении аномалий, соответствующих сохраненным ранее описаниям.

6. Заключение

Одной из проблем «больших данных», накапливаемых при эксплуатации современного связного оборудования, является проблема их рационального использования.

Современной тенденцией является внедрение в практику предприятия предиктивного техобслуживания, которое предусматривает своевременное обнаружение аномального поведения оборудования. Наиболее предпочтительным является применение подхода обнаружения аномалий в поведении оборудования, основанного на данных, “*data driven*”. В этом подходе для обнаружения аномалий и диагностики неисправностей строятся модели на базе имеющихся больших массивов разного рода телеметрии. Преимуществом таких моделей является их независимость от знаний экспертов предметной области.



Рис. 18. Процедура выявления аномалий при пакетной обработке данных.

Fig. 18. Anomaly detection procedure for data batch processing

Список литературы

1. Aggarwal C. C. Outlier Analysis. 2nd ed. Springer International Publishing, 2016. 465 p.
2. Angiulli F., Pizzuti C. Outlier mining in large high-dimensional data sets // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2005. Vol. 17, no. 2. P. 203—215.
3. IP Quality Monitor (IQM) // <http://www.net-probe.ru>. Viewed February 27, 2023.
4. Sammon J. W. A nonlinear mapping for data structure analysis // IEEE Transactions on Computers. 1969. Vol. 18, no. 5. P. 401—409.
5. Fulcher B. D. Feature-based time-series analysis. Preprint arXiv:1709.08055, 2017. 28 p.
6. Daw C. S., Finney C. E. A., Tracy E. R. A review of symbolic analysis of experimental data // Review of Scientific Instruments. 2003. Vol. 74, no. 2. P. 915—930.
7. Чикало О. В., Александров В. Р., Обухов И. А. Система раннего обнаружения проблемного телекоммуникационного оборудования // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии. 2020. № 2. С. 128—129.

Информация об авторах

Чикало Олег Владимирович, начальник лаборатории АО «НПП «Радиотехника», г. Москва, Российская Федерация.

Обухов Илья Андреевич, технический директор АО «НПП «Радиотехника», г. Москва, Российская Федерация.

Models of Communication Channels Normal Behavior

O. V. Chikalo and I. A. Obukhov

Scientific-Industrial Company “Radiotekhnika”
15, build. 11, 5th Donskoy proezd, Moscow, 115419, Russian Federation
tchikalo@mail.ru, iao001@mail.ru

Received: April 3, 2023

Peer-reviewed: May 15, 2023

Accepted: May 19, 2023

Abstract: *Models describing the normal operation of communication channels are considered. By using of such models is possible to identify abnormal behavior of telecommunications equipment and take the efforts that necessary to maintain its performance. To this goal “big data” generated by telemetry of telecommunications devices are analyzed.*

Keywords: *predictive analytics, diagnostic system, normal behavior, model, quality monitor, Internet of things, telecommunications.*

For citation (IEEE): O. V. Chikalo and I. A. Obukhov, “Models of Communication Channels Normal Behavior,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 15–34, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.02. (In Russ.).

References

- [1] C. C. Aggarwal, *Outlier Analysis*. Springer Cham, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-47578-3.
- [2] F. Angiulli and C. Pizzuti, “Outlier mining in large high-dimensional data sets,” *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 203–215, Feb. 2005, doi: 10.1109/TKDE.2005.31.
- [3] IP Quality Monitor (IQM) // <http://www.net-probe.ru>. Viewed February 27, 2023.
- [4] J. W. Sammon, “A Nonlinear Mapping for Data Structure Analysis,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. C-18, no. 5, pp. 401–409, May 1969, doi: 10.1109/T-C.1969.222678.
- [5] B. D. Fulcher, “Feature-based time-series analysis.” Preprint arXiv:1709.08055, 2017.
- [6] C. S. Daw, C. E. A. Finney, and E. R. Tracy, “A review of symbolic analysis of experimental data,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 74, no. 2, pp. 915–930, Feb. 2003, doi: 10.1063/1.1531823.
- [7] O. V. Chikalo, V. R. Aleksandrov, I. A. Obukhov, “System for Early Detection of Problematic Telecommunication Equipment,” *Microwave and Telecommunication Technology*, no. 2, pp. 128–129, 2020. (In Russ.).

Information about the authors

Oleg V. Chikalo, Head of Laboratory of JSC NPP “Radiotekhnika”, Moscow, Russian Federation.

Ilya A. Obukhov, Technical Director of JSC NPP “Radiotekhnika”, Moscow, Russian Federation.

УДК 654.9

Основные направления деятельности ООО «ТПК Элсервис» в части противодействия беспилотным воздушным судам

Козачок Н. И.

ООО «ТПК Элсервис»

*г. Москва, 125212, Кронштадтский бульвар, 5а, Российская Федерация
TPC-Elservice@yandex.ru*

Получено: 5 мая 2023 г.

Отрецензировано: 15 мая 2023 г.

Принято к публикации: 19 мая 2023 г.

Аннотация: *В статье представлены основные направления деятельности ООО «ТПК Элсервис» в части расширения тактических и технических характеристик разработанных ранее малогабаритных средств радиотехнической разведки (РТР) и радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Приведено краткое описание автоматического поста РТР. Представлен автоматизированный комплекс для измерения характеристик логопериодических антенн. Приведены краткие характеристики радара X-диапазона — FMCW для решения задач обнаружения и траекторного сопровождения беспилотных летательных аппаратов (БЛА).*

Ключевые слова: *радиотехническая разведка, радиоэлектронная борьба, малогабаритные средства, логопериодическая антенна, X-диапазон, беспилотные летательные аппараты.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Козачок Н. И. Основные направления деятельности ООО «ТПК Элсервис» в части противодействия беспилотным воздушным судам // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 1. С. 35—43.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Козачок, Н. И. Основные направления деятельности ООО «ТПК Элсервис» в части противодействия беспилотным воздушным судам / Н. И. Козачок // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 1. — С. 35 —43.

1. Введение

Анализ локальных конфликтов в Сирийской Арабской Республике, Нагорном Карабахе и на Украине показал, что противоборствующие стороны активно применяют разведывательные и ударные БЛА.

Актуальными на сегодня являются следующие задачи по обеспечению безопасности административных и промышленных объектов, объектов критической инфраструктуры, баз хранения горюче-смазочных материалов, вооружения и военной техники (ВВТ), личного состава от разведывательных и ударных беспилотников, как в зоне проведения СВО, так и на территории РФ:

- своевременное обнаружение и траекторное сопровождение БЛА;
- измерение параметров сигналов в диапазоне частот от 400 до 8000 МГц, определение направления на пункты управления и БЛА;
- формирование прицельных по пространству и частоте помех в диапазоне частот от 400 до 6000 МГц;
- автоматизация процессов измерения параметров широкополосных кольцевых антенных решеток с целью сокращения времени изготовления комплекса РТР и РЭБ.

В настоящей статье приведены результаты реализации перечисленных выше задач — конструкторские решения и рабочие интерфейсы.

2. Результаты модернизации автономного малогабаритного комплекса РТР и РЭБ

Новыми возможностями модернизации являются последовательное обнаружение, анализ и измерение параметров обнаруженных сигналов, пеленгование источников радиосигналов (до 32-х источников), с последующей постановкой блокирующих помех, прицельных по частоте, направлению и структуре сигналов.

Расширение технических характеристик платформы РТР [1] состоит в создании новой кольцевой антенной решетки (АР), в которой расширен диапазон рабочих частот с 3000 МГц до 8000 МГц. Уточненный рабочий диапазон частот платформы РТР от 400 до 8000 МГц.

В платформе РЭБ [1] был расширен частотный диапазон формирования помехового сигнала с 3000 до 6000 МГц. Для реализации этой задачи был разработан оконечный широкополосный усилитель от 0,9 до 6000 МГц.

В комплексе РТР и РЭБ [1] при анализе сигналов строится частотно-временная матрица (ЧВМ) исследуемого сигнала. Алгоритм построения матрицы был доработан для определения (по ЧВМ) характеристик радарных сигналов, таких как *PRT* (длительность между импульсами излучения), *PRI* (интервал между пачками), определение количества импульсов пачки, время обзора радара и т. д.

В платформах РТР и РЭБ оптимизирована защита приемной и передающей кольцевых антенных решеток от пыли и метеоосадков (рис. 1).

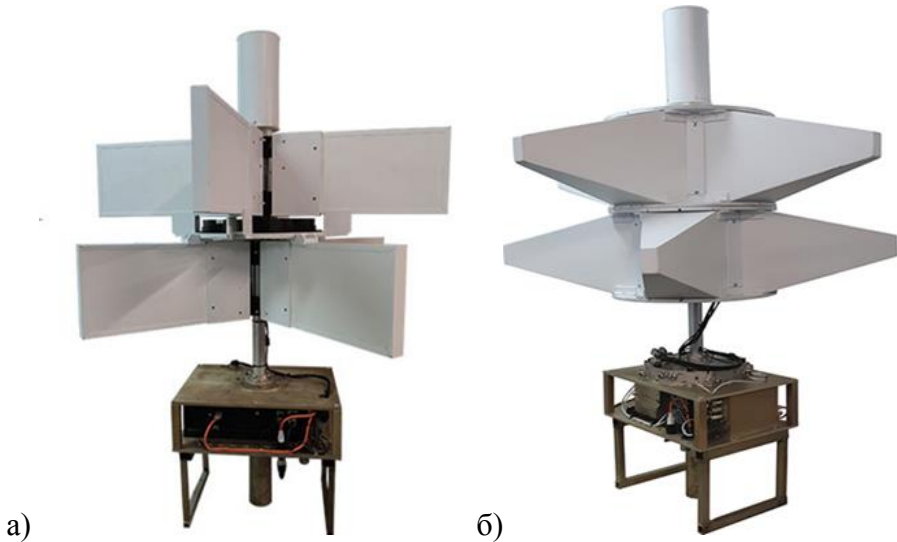


Рис. 1. Внешний вид автономного малогабаритного комплекса РТР и РЭБ:
а) платформа радиотехнической разведки; б) платформа радиоэлектронной борьбы.

Fig. 1. Appearance of the autonomous small-sized radio reconnaissance and electronic warfare complex:
a) radio reconnaissance platform; б) electronic warfare platform

Для поста обнаружения разработана программа анализа для записанных сигналов I, Q . Она позволяет получить видеосигнал с выхода детекторов АМн, ЧМн анализируемого сигнала и оценить внутреннюю структуру сигнала. Например, если сигнал промодулирован кодом Баркера, то определить длину кода Баркера. Для случая, когда используется LFM сигнал, оценивается база $B \times T LFM$ сигнала, а также наклон частотной характеристики указанного сигнала (положительный или отрицательный).

Программа также строит конstellации для сигналов $BPSK, QPSK, QAM16$ с автоматическим определением символьной частоты, несущей и компенсацией неравномерности приемного тракта. Далее по построенной конstellации оператор может определить вид модуляции (рис. 2).

3. Автоматический пост обнаружения, анализа сигналов и определения направления на источник радиоизлучения

Модификация станции РТР (для решения задачи обнаружения БПЛА и обработки режима «Автомат»; режим «Автомат» — режим определения пеленга на источник (и) излучения, расчет их центральных частот

и определение ширины спектра сигналов источников излучения без участия оператора) осуществлялась путем замены антенной решетки на вращающуюся антенну и заменой панорамного приемника *SNA-18* на конвертер сигналов 830—930 МГц, 1200—1300 МГц, 2400—2500 МГц, 5150—5250 МГц, 5725—5850 МГц в промежуточную частоту (ПЧ) 2140 ± 50 МГц (указаны пять частотных участков, в которых работают БПЛА).

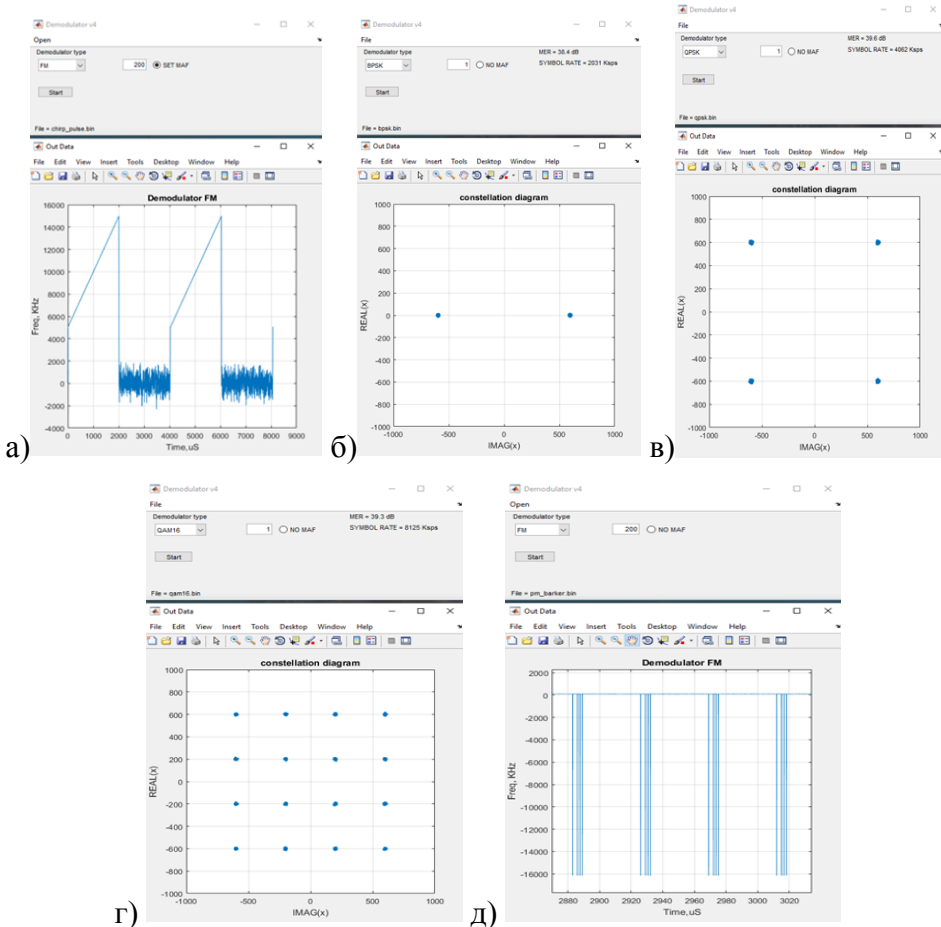


Рис. 2. Вид модуляции: а — ЛЧМ; б — *BPSK*; в — *QPSK*, г — *16-QAM*; д — код Баркера.

Fig. 2. Type of modulation:

а – sweep-frequency modulation; б – *BPSK*; г – *16-QAM*; д – Barker code

Плата обработки сигналов ПЧ, а, следовательно, и весь интерфейс обработки, были взяты без изменений из станции РТР [1]. Это позволило

получить модифицированную станцию РТР с небольшими затратами на её производство и небольшими габаритами (рис. 3). Соответственно снизилось время на развёртывание станции (тестирование режима «Автомат» осуществлялась по реальным сигналам БПЛА). Поворот антенны осуществляется по квадрантам (N, W, S, O) в диапазоне $0—360^\circ$ по азимуту.

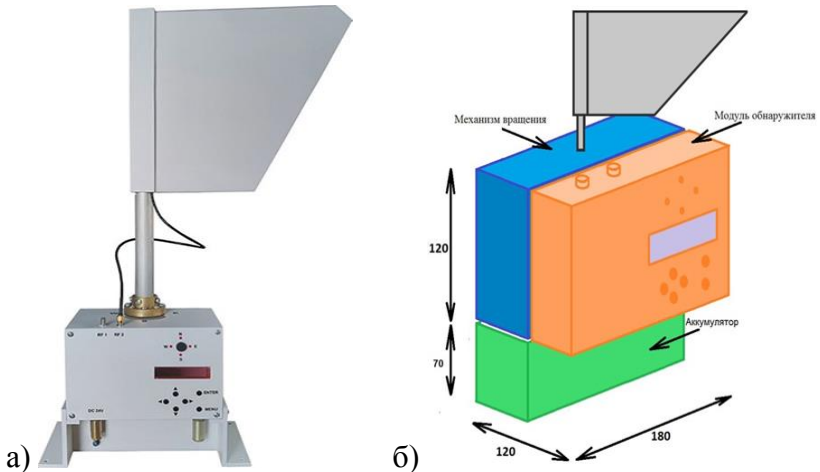


Рис. 3. Внешний вид автоматического поста обнаружения, анализа и определения направления на источник радиоиизлучения: а) действующий макетный образец; б) 3D-модель.
Fig. 3. Appearance of the automatic post for detection, analysis and determination of the direction to the source of radio emission: а) a working prototype; б) 3D model

Режим «Автомат» работает следующим образом.

В каждом из четырёх направлений производится многократное сканирование спектра с запоминанием максимальных значений уровней спектральных составляющих — режим *hold max*. Это многократное сканирование осуществляется в каждом из пяти указанных участков частотного диапазона возможной работы БПЛА.

После полного поворота антенн (один поворот антенны осуществляется за 10 с) по каждому из пяти возможных частотных участков работы БПЛА строится результирующий спектр. В результирующем спектре отражаются только те бины и с того направления (N, W, S, O), которые имеют максимальное значение. Например, для частотного диапазона 2400—2500 МГц, пусть это будут бины от i до $i+N$, имеющие максимальный уровень с направления N , а бины от j до $j+K$ имели максимальное значение с направления W . В результирующем спектре частотного диапазона 2400—2500 МГц будут отражены бины от i до $i+N$ (с дополнительной информа-

цией о том, что они «пришли» с направления N , и бины от j до $j+K$ с информацией о том, что эти бины «пришли» с направления W).

Обработка результирующих спектров в пяти частотных диапазонах позволяет определить центральные частоты, пеленг и ширину спектра сигнала источника излучения.

Внешний вид автоматического поста обнаружения, анализа и определения направления на источник радиоизлучения приведен на рис. 3. Время автономной работы от аккумуляторной батареи составляет около восьми часов. Вес поста не превышает 5 кг.

4. Автоматизированный стенд для измерения характеристик логопериодических антенн

Для решения задачи сокращения времени изготовления кольцевых антенных решеток для комплекса РТР и РЭБ потребовалось автоматизировать процесс измерения диаграмм направленности (ДН) путём создания управляемой поворотной платформы, перестраиваемого генератора сигнала и измерительного приемника (рис. 4).

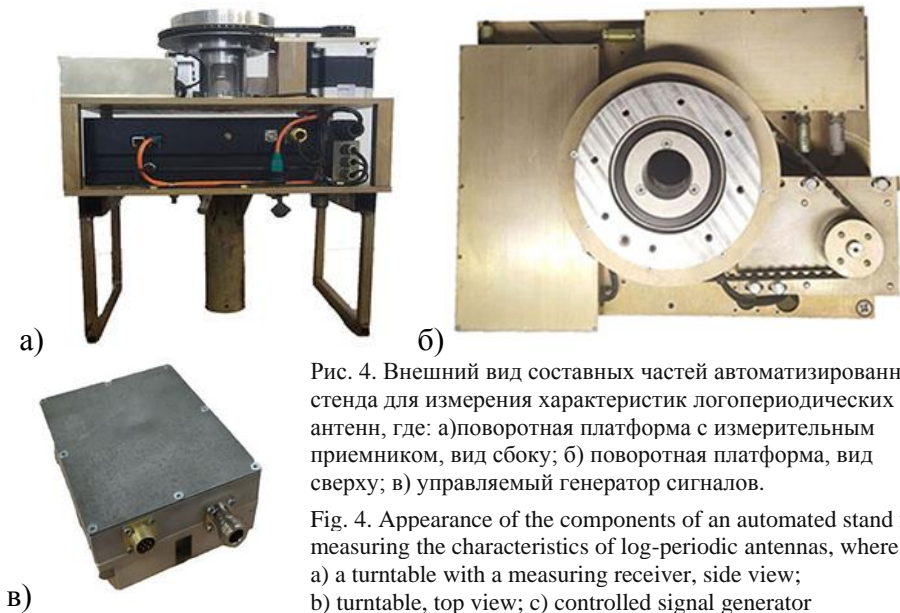


Рис. 4. Внешний вид составных частей автоматизированного стенда для измерения характеристик логопериодических антенн, где: а) поворотная платформа с измерительным приемником, вид сбоку; б) поворотная платформа, вид сверху; в) управляемый генератор сигналов.

Fig. 4. Appearance of the components of an automated stand for measuring the characteristics of log-periodic antennas, where:

- а) a turntable with a measuring receiver, side view;
б) turntable, top view; в) controlled signal generator

Снятие ДН антенн осуществлялось без участия оператора. При таком подходе удалось довести время измерения ДН восьми антенн, входящих в кольцевую АР, до 20 минут. Измерения проводились в диапазоне частот от

0,9 до 8 ГГц с шагом по частоте 10 МГц. При этом шаг поворотной платформы составлял 5° . Поворот платформы производился по азимуту от 0 до 360° . Количество измерений составило 460 000 измерений.

Это позволило сократить в разы время проверки расчетных данных по антеннам, а также оптимизировать взаимное расположение антенн друг относительно друга с целью исключения их взаимного влияния.

5. Малогабаритный радар X-диапазона — FMCW

Радар предназначен для обнаружения воздушных, надводных и наземных целей, определения их координат и скорости перемещения в радиусе 10 км.

Внешний вид радара приведен на рис. 5, основные тактико-технические характеристики радара приведены в Таблице 1.



Рис. 5. Внешний вид радара FMCW.

Fig. 5. Appearance of the FMCW radar

Таблица 1. Основные тактико-технические характеристики

№ п/п	Наименование	Значение
1	Дальность обнаружения БВЦ с эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР), км: 1,0 м ² 0,1 м ² 0,01 м ²	6,0 3,0 1,7
2	Скорость обзора воздушного пространства по азимуту, обор./мин.	12,0
3	Сектор обзора воздушного пространства по азимуту, град.	0—360
4	Разрешение по азимуту, град.	2,0
5	Селекция движущихся цепей (СДЦ)	+
6	Пиковая мощность излучения, Вт	4,0—10,0
7	Вид излучения	непрерывное
8	Рабочий диапазон частот, МГц	9400—9440

№ п/п	Наименование	Значение
9	Вид излучаемого сигнала	<i>FMCW</i>
10	Коэффициенты усиления приемной и передающей антенн, дБ	26,0
11	Уровень боковых лепестков, дБ,	-30,0
12	Уровень подавления кроссполяризации дБ	-30,0
13	Чувствительность приемного устройства, дБ/Вт	-156,0

Для своевременного обнаружения и обеспечения траекторного сопровождения БЛА с целью определения направления его полета выполнена стыковка платформ РТР и РЭБ с радаром X-диапазона — *FMCW*. Конструктивно платформы РТР, РЭБ и радар выполнены на унифицированной платформе.

6. Заключение

В результате проведенной модернизации комплекса РТР и РЭБ [1] было достигнуто расширение частотного диапазона платформы РТР с 3000 МГц до 8000 МГц и платформы РЭБ — с 3000 до 6000 МГц. Усовершенствование обработки принимаемых сигналов позволило определять виды модуляции и параметры сигналов ЛЧМ, *BPSK*, *QPSK*, *16-QAM*, код Баркера и др., что может быть использовано для вскрытия протоколов управления БЛА и их перехвата, а также повышения эффективности подавления каналов управления.

Разработан упрощенный вариант исполнения платформы РТР.

Для сокращения сроков изготовления кольцевых антенных решеток для комплекса РТР и РЭБ был разработан автоматизированный стенд для измерения характеристик логопериодических антенн. Это позволило сократить время измерения ДН восьми логопериодических антенн, входящих в кольцевую АР, например, платформы РТР, до 20 минут.

Для своевременного обнаружения, обеспечения траекторного сопровождения БЛА с целью определения направления его полета и формирования прицельных помех в направлении на БЛА выполнена стыковка платформ РТР и РЭБ с радаром X-диапазона — *FMCW*.

Список литературы

1. Водяных А. А., Бритков А. В., Горбанов Н. А. и др. Конструкторские решения и интерфейсы оборудования радиотехнической разведки, радиоэлектронного подавления и блокирования радиолиний связи и управления // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 1. С. 41—62.

Информация об авторе

Козачок Николай Иванович, главный инженер, ООО «ТПК Элсервис», г. Москва, Российская Федерация.

The Main Activities of TPK Elservice LLC in Countering Drones

N. I. Kozachok

TPK Elservice LLC

Kronstadtsky proyezd, 5a, Moscow, 125212, Russian Federation
TPC-Elservice@yandex.ru

Received: May 5, 2023

Peer-reviewed: May 15, 2023

Accepted: May 19, 2023

Abstract: *The article presents the main activities of TPK Elservice LLC in terms of expanding the tactical and technical characteristics of the previously developed small-sized means of radio reconnaissance and electronic warfare. A brief description of the radio reconnaissance automatic post is given. An automated complex for measuring the characteristics of log-periodic antennas is presented. Brief characteristics of the X-band radar – FMCW for solving the problems of detection and trajectory tracking of drones are given.*

Keywords: *radio reconnaissance, electronic warfare, small-sized means, log-periodic antenna, X-band, drones.*

For citation (IEEE): N. I. Kozachok, “The Main Activities of TPK Elservice LLC in Countering Drones,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 35–43, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.03. (In Russ.).

References

- [1] A. A. Vodyanykh et al. “Design solutions and interfaces of radio intelligence equipment, radio-electronic suppression and blocking of radio communication links and control,” *Infocommunications and Radio Technologies*, 2020, vol. 3, no. 1, pp. 41–62.

Information about the author

Nikolay I. Kozachok, Chief Engineer, TPK Elservice LLC, Moscow, Russian Federation.

УДК 621.382.2/.3:004.333

Ячейка памяти на основе пересекающихся нанопроводов

Обухов И. А., Обухов И. И.

*Научно-производственное предприятие «Радиотехника»
г. Москва, 115419, 5-й Донской проезд, д. 15, стр. 11, Российская Федерация
iao001@mail.ru*

Получено: 03 января 2023 г.

Отрецензировано: 01 февраля 2023 г.

Принято к публикации: 10 февраля 2023 г.

Аннотация: *Представлены конструкция и расчеты основных характеристик ячейки памяти на основе пересекающихся нанопроводов различного поперечного сечения. Функционирование устройства возможно, если поперечные размеры нанопроводов обеспечивают размерное квантование энергии электронов в рабочей области температур. В этом случае области пересечения нанопроводов различного поперечного сечения представляют собой квантовые ямы для электронов. Управляемое приложенным напряжением туннелирование электронов между квантовыми ямами обеспечивает запись информации. Скорость записи может достигать 1 Пбайт/с (10^{15} байт/с).*

Ключевые слова: *память, нанопровод, размерное квантование, полупроводник, квантовый прибор.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Обухов И. А., Обухов И. И. Ячейка памяти на основе пересекающихся нанопроводов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 1. С. 44—52.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Обухов, И. А. Ячейка памяти на основе пересекающихся нанопроводов / И. А. Обухов, И. И. Обухов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 1. — С. 44—52.

1. Введение

Более двадцати пяти лет назад в частной беседе автора с П. Н. Лускиновичем¹ о перспективах применения нанопроводов в электронике Петр Николаевич заметил, что области пересечения нанопроводов могут быть

¹ Петр Николаевич Лускинович — разработчик первых в России сканирующих туннельных микроскопов, лауреат премии ЮНЕСКО «За вклад в развитие нанонауки и нанотехнологий».

важными функциональными элементами квантовых приборов. Первым предложением по реализации этой идеи можно считать квантовый транзистор с инжекционным затвором [1, 2].

В этом приборе область пересечения нанопровода меньшего поперечного сечения, канала транзистора, с нанопроводом большего поперечного сечения, затвором транзистора, представляет для электронов в канале квантовую яму. При изменении напряжения затвора изменяется уровень инжекции электронов из квантовой ямы в канал. Расчетная крутизна вольт-амперной характеристики (ВАХ) такого транзистора на три порядка превышает крутизну ВАХ полевого транзистора на основе нанопровода.

В настоящей работе рассмотрена возможность использования квантовых ям, образующихся на пересечении нанопроводов, в качестве систем с переменным зарядом, зависящим от приложенного напряжения. Конструкция из трех пересекающихся нанопроводов (рис. 1) позволяет реализовать две такие квантовых ямы (рис. 2). Туннелирование электронов между ними в одном направлении изменяет разность потенциалов в перпендикулярном направлении. Этот простой эффект обеспечивает возможность записи информации.

2. Конструкция и принцип функционирования

На рис. 1 показана конструкция предлагаемой ячейки памяти. Она представляет собой нанопровод, который мы будем называть тонким, и два пересекающих его перпендикулярно одинаковых нанопровода большего поперечного сечения, которые будем называть толстыми. Нанопровода отделены друг от друга и от металлических контактов изолирующим материалом.

В качестве материала нанопроводов на рис. 1 указан арсенид галлия, в качестве разделяющего их материала — алюминий арсенид, а в качестве контактов — золото. Это те материалы, для которых проводились расчеты. Аналогичная ячейка памяти может быть реализована и на других полупроводниковых материалах с соответствующими металлическими контактами.

Для того чтобы конструкция была функционально пригодной, необходимо чтобы размеры тонкого нанопровода обеспечивали размерное квантование энергии электронов в диапазоне рабочих температур устройства. В расчетах мы полагали, что нанопровода имеют квадратное поперечное сечение со сторонами квадрата $L_{cx} = 5$ нм для тонкого и $L_{cy} = 20$ нм для толстого проводов. Длина тонкого нанопровода $L_x = 72$ нм, длины толстых проводов одинаковы и равны $L_y = 72$ нм. Температура равнялась 300°K . Для арсенида галлия размерное квантование энергии

электронов при такой температуре наблюдается при размерах, меньших чем $L_{dq}(300^\circ K) = 25 \text{ нм}$.

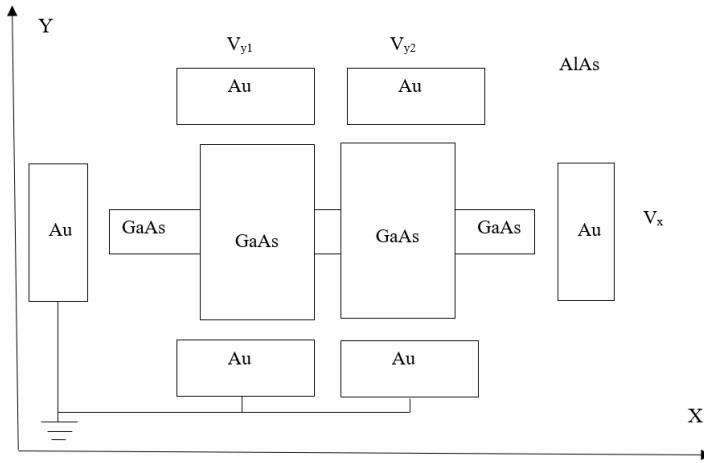


Рис. 1. Конструкция ячейки памяти на пересекающихся нанопроводах.

Fig. 1. Design of a memory cell on intersecting nanowires

Расстояние между толстыми нанопроводами выбрано $L = 5 \text{ нм}$. Зазор между контактами и нанопроводами L_d в расчетах составил также 5 нм . При высоте потенциального барьера в $1,9 \text{ эВ}$ зазор оказывается туннельно-непрозрачным для электронов, коэффициент прохождения составляет величину порядка 10^{-9} .

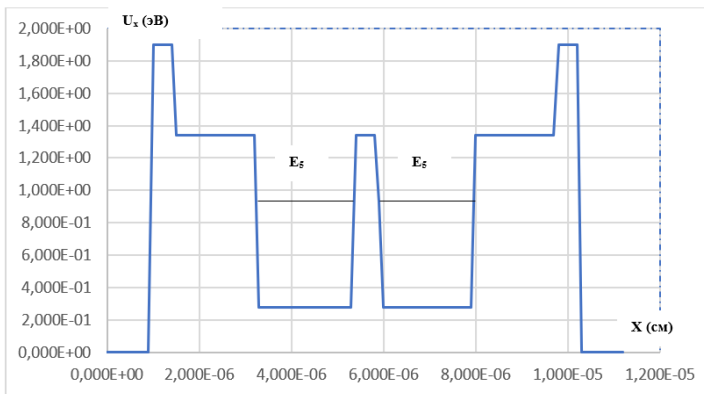


Рис. 2. Потенциальный рельеф для электронов в тонком нанопроводе при нулевой разности потенциалов.

Fig. 2. Potential relief for electrons in a thin nanowire at zero potential difference

Потенциальный рельеф для электронов в тонком нанопроводе $U_x(x)$ при нулевой разности потенциалов ($V_x = 0$) между контактами показан на рис. 2. Представлен вариант, когда тонкий провод не легирован, а толстый содержит полностью ионизованную донорную примесь с концентрацией $N_y = 7,75 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Уровень легирования толстого нанопровода является параметром, определяющим выходные характеристики прибора, и может быть выбран в зависимости от предъявляемых к нему требований. Отметим, что при указанной концентрации N_y арсенид галлия при комнатной температуре является невырожденным.

Потенциальные ямы, создаваемые толстыми нанопроводами при пересечении тонкого нанопровода, имеют глубину $U = 1,06 \text{ эВ}$. В них помещается девять квазистационарных энергетических уровней размерного квантования. На рис. 2 показано положение пятого уровня $E_5 = 0,935 \text{ эВ}$. При нулевой разности потенциалов между контактами нанопровода энергии всех уровней в обеих ямах совпадают и их заполнения электронами одинаковы. Следовательно, одинаковы и электрические заряды, локализованные в потенциальных ямах.

На рис. 3 показан потенциальный рельеф для электронов в толстом нанопроводе. Тонкий нанопровод образует для электронов потенциальный барьер шириной 5 нм и высотой 0,41 эВ.

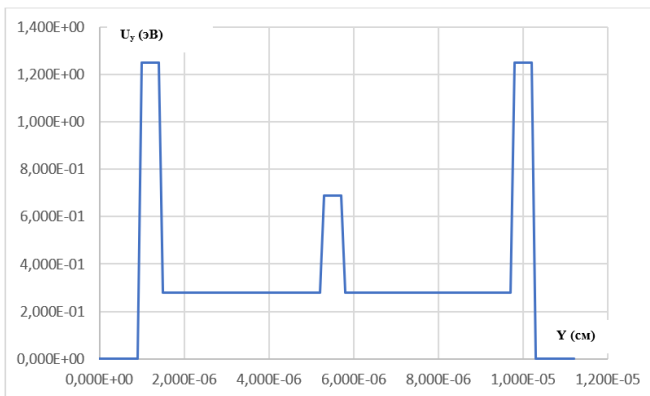


Рис. 3. Потенциальный рельеф для электронов в толстом нанопроводе при нулевой разности потенциалов.

Fig. 3. Potential relief for electrons in a thick nanowire at zero potential difference

Потенциальный барьер между ямами на рис. 2 туннельно-прозрачен. При нулевом смещении, как мы уже отметили, заряды электронов в потенциальных ямах одинаковы. Если же между контактами тонкого нано-

провода создать разность потенциалов (см. рис. 4), то потенциальный рельеф деформируется. Заполнение электронных уровней в потенциальных ямах, требуемое статистикой, уже не будет одинаковым. Электроны из потенциальной ямы с большей энергией будут туннелировать в потенциальную яму с меньшей энергией. В результате, левый и правый толстые нанопровода окажутся заряжены по-разному, и между их контактами возникает разность потенциалов $V_y = V_{y1} - V_{y2}$ (см. рис. 5).

Таким образом, разность потенциалов между контактами тонкого нанопровода V_x индуцирует разности потенциалов между контактами толстых нанопроводов V_{y1} и V_{y2} . В случае, представленном на рис. 4 и 5, напряжение $V_x = 0,5$ В индуцирует напряжения $V_{y1} = -0,118$ В и $V_{y2} = 0,118$ В. В результате, между верхними контактами толстых нанопроводов (см. рис. 1) возникнет разность потенциалов $V_y = -0,236$ В.

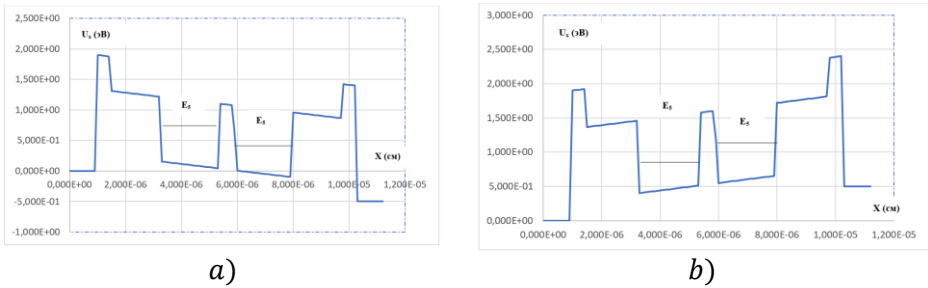


Рис. 4. Потенциальный рельеф для электронов в тонком нанопроводе при разности потенциалов: а) $V_x = 0,5$ В, б) $V_x = -0,5$ В.

Fig. 4. Potential relief for electrons in a thin nanowire at a potential difference: а) $V_x = 0,5$ V, б) $V_x = -0,5$ V

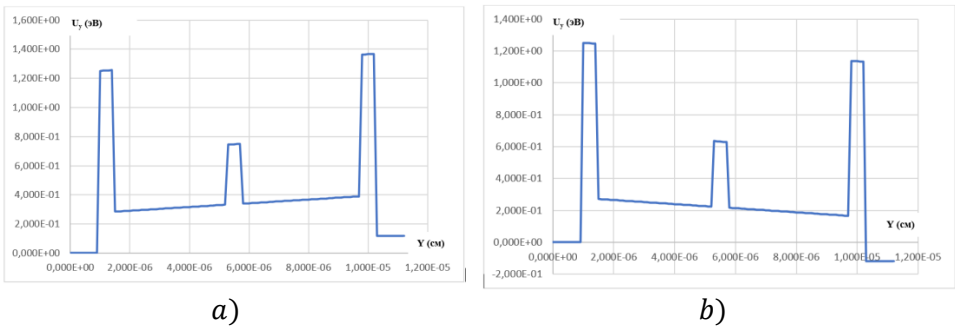


Рис. 5. Потенциальный рельеф для электронов в левом а) и правом б) толстых нанопроводах при разности потенциалов в тонком нанопроводе $V_x = 0,5$ В.

Fig. 5. Potential relief for electrons in the left а) and right б) thick nanowires at a potential difference in a thin nanowire $V_x = 0,5$ V

Если использовать тонкий нанопровод для записи информации, осуществляемой подачей на него кратковременной разности потенциалов, то с контактов толстых нанопроводов эту информацию можно считать. Запись и считывание информации с высокой скоростью представляет собой самостоятельную проблему, которую мы здесь обсуждать не будем. Также дополнительного исследования требуют вопросы длительности хранения информации в предлагаемой ячейке памяти и стойкости ее к перепадам температур и другим внешним воздействиям.

3. Простые оценки

Корректные расчеты характеристик исследуемого прибора требуют самосогласованного решения как минимум двумерных уравнений Шредингера и Пуассона [3]. Приведенные выше результаты были получены в рамках одномерной модели. Их можно рассматривать, как первое приближение.

Из физических соображений можно получить простые формулы, позволяющие оценивать характеристики предложенной ячейки памяти. Для емкости толстого нанопровода справедливо приближенное выражение

$$C_y = \varepsilon L_{cy}^2 / (L_y + 2L_d), \quad (1)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость материала, в нашем случае равная 1,14 пФ/см.

Максимальный заряд, который может перетечь из одной квантовой ямы в другую, можно оценить как

$$Q_{y\max} = e(n_i + N_y)L_{cy}^2 L_{cx}. \quad (2)$$

Здесь: e — элементарный заряд; n_i — собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике ($1,1 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ для *GaAs* при комнатной температуре); N_y — концентрация ионизованной донорной примеси.

Для максимальной разности потенциалов, которую можно индуцировать на толстом нанопроводе при помощи описанного выше механизма, получим

$$V_{y\max} = Q_{y\max} / C_y = e(n_i + N_y)(L_y + 2L_d)L_{cx} / \varepsilon. \quad (3)$$

Заметим, что эта величина не зависит от поперечного размера толстого нанопровода.

Из формулы (3) следует, что $V_{y\max}$ тем больше, чем больше L_{cx} . Однако увеличение L_{cx} ведет к уменьшению глубины квантовых ям и, в ко-

нечном счете, к их исчезновению. То есть к исчезновению эффекта, лежащего в основе функционирования рассматриваемой ячейки памяти.

Отсюда следует, что для увеличения $V_{y_{max}}$ можно использовать только уровень легирования толстых нанопроводов N_y . Легко вычислить, что для нелегированных нанопроводов ($N_y = 0$) напряжение $V_{y_{max}} \sim 10^{-12}$ В — величина, с трудом поддающаяся измерению. При $N_y \sim 10^{18}$ см⁻³ максимально достижимое напряжение составляет уже десятые доли вольт.

Важной характеристикой памяти является время записи. В нашем случае оно зависит от скорости изменения заряда квантовых ям при подаче напряжения на тонкий нанопровод. То есть от времени туннелирования. Его можно оценить по формуле Хартмана [4]

$$\tau(E) \approx \hbar / (E(U - E))^{1/2}, \quad (4)$$

где: \hbar — приведенная постоянная Планка; E — уровень энергии, с которого происходит туннелирование; U — высота потенциального барьера, через который происходит туннелирование. В нашем случае получим $\tau(E) \sim 10^{-15}$ с для всех уровней энергии в потенциальных ямах.

4. Заключение

В этой работе предложена конструкция ячейки памяти на основе пересекающихся нанопроводов. Принцип функционирования устройства основан на туннелировании электронов между квантовыми ямами, образующимися в областях пересечения нанопроводов. Предварительные оценки показывают, что в таком элементе может быть достигнута скорость записи информации порядка Пбайт/с.

Расчеты производились для нанопроводов из арсенида галлия при комнатной температуре. Для них характерный размер ячейки составляет 100 нм, а характерные значения напряжений записи и чтения информации — десятые доли вольт. Если использовать нанопровода из антимонида индия, то характерные размеры могут быть увеличены вдвое, а напряжения уменьшены до сотых долей вольт.

Для определения практической применимости рассматриваемой ячейки памяти следует провести более тщательное моделирование ее характеристик и исследовать влияние на них внешних факторов, таких как изменения температуры окружающей среды, внешнее электромагнитное излучение и т. д.

Список литературы

1. Статические характеристики пересекающихся квантовых проводов / И. А. Обухов и др. В сб. : 14-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2004 (Севастополь, 13—17 сент. 2004 г.). 2004. С. 507—511.
2. Obukhov I. A. Planar One-Dimensional Quantum Devices // Nanoscience and Nanotechnology. 2013. Vol. 3, no 5. P. 115—122.
3. Обухов И. А. Моделирование переноса заряда в мезоскопических структурах. Москва — Киев — Минск — Севастополь : «Вебер», 2005. 226 с.
4. Hartman T. E. Tunneling of a Wave Packet. // J. Appl. Phys. 1962. Vol. 33, no. 12. P. 3427—3433.

Информация об авторах

Обухов Илья Андреевич, технический директор АО «НПП «Радиотехника», г. Москва, Российская Федерация.

Обухов Илья Ильич, стажер АО «НПП «Радиотехника», г. Москва, Российская Федерация.

Memory Cell Based on Crossed Nanowires

I. A. Obukhov and I. I. Obukhov

Scientific-Industrial Company "Radiotekhnika"

15, build. 11, 5th Donskoy proezd, Moscow, 115419, Russian Federation
iao001@mail.ru

Received: January 03, 2023

Peer-reviewed: February 01, 2023

Accepted: February 10, 2023

Abstract: *The design and calculations of basic characteristics of memory cell based on crossed nanowires with different cross-sections are presented. The device operation is possible if the transverse dimensions of the nanowires provide dimensional quantization of the electron energy in the working temperature values. In this case, the intersecting regions of nanowires with different cross-sections are the quantum wells for electrons. Tunneling of electrons between quantum wells controlled by applied voltage provides information recording. The write rate of cell can reach $Pbytes/s = 10^{15}$ bytes/s.*

Keywords: *memory, nanowire, dimensional quantization, semiconductor, quantum device.*

For citation (IEEE): I. A. Obukhov and I. I. Obukhov, "Memory Cell Based on Crossed Nanowires," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 44–52, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.04. (In Russ.).

References

- [1] I. A. Obukhov, I. I. Kvyatkevich, A. A. Lavrenchuk, S. V. Rumyantsev, "Static Characteristics of Crossed Quantum Wires. In : 2004 14th International Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2004), September 13–17, 2004. Sevastopol : Weber Publ. Co., 2004, pp. 507–511. (In Russ.).
- [2] I. A. Obukhov, "Planar One-Dimensional Quantum Devices," *Nanoscience and Nanotechnology*, v. 3, no 5, pp. 115–122, 2013, doi: 10.5923/j.nn.20130305.02.
- [3] I. A. Obukhov, *Modeling of Charge Transfer in Mesoscopic Structures*, Moscow–Kyiv Minsk–Sevastopol, Weber Publ.Co., 2005. (In Russ.).
- [4] T. E. Hartman, "Tunneling of a Wave Packet," *J. Appl. Phys.*, vol. 33, no. 12, pp. 3427–3433, 1962, doi: 10.1063/1.1702424.

Information about the authors

Ilya A. Obukhov, Technical Director of JSC NPP Radiotekhnika, Moscow, Russian Federation.

Ilya I. Obukhov, improver at JSC NPP Radiotekhnika, Moscow, Russian Federation.

UDC 621.371.3

Modeling of the Propagation of LF–MF–SF Bands Electromagnetic Waves on Arctic Paths

Yu. B. Bashkuev and M. G. Dembelov

*Institute of Physical Materials Science
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
6, Sakhyanova str., 670047, Ulan-Ude, Russian Federation
buddich@mail.ru*

Received: April 28, 2023

Peer-reviewed: May 5, 2023

Accepted: May 5, 2023

Abstract: *The article demonstrates that the conditions of LF–MF–SF bands electromagnetic wave propagation over the “ice-sea” structure with highly inductive impedance are more favorable than over the sea without ice because of the appearance of surface electromagnetic waves (SEW). It was determined that the conditions of radio wave propagation over ice paths depend on a frequency, ice thickness and distance from the transmitter within the 100 kHz – 5 MHz range on the paths with ice thickness from 0.6 to 2.7 meters.*

Keywords: *surface electromagnetic wave (SEW), attenuation function, surface impedance, sea ice, sea water, radio wave propagation.*

For citation (IEEE): Yu. B. Bashkuev and M. G. Dembelov, “Modeling of the Propagation of LF–MF–SF Bands Electromagnetic Waves on Arctic Paths,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 53–62, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.05.

1. Introduction

A study of radio wave propagation over the ice-covered sea areas is of great importance in the connection with the problem of the surface electromagnetic wave (SEW). Many of LW–MW–SW radio systems in the Arctic seas work in the range of 100 kHz to 5 MHz. The review of literature on the area of water of the Arctic and the Antarctic showed that the electromagnetic characteristics of the “ice-sea” stratified media with sharply contrasting electric properties and the processes of radio wave propagation over them are not sufficiently studied [1, 2].

The aim of this study is efficiency assessment of communication and navigation channels in the Arctic regions on the basis of analysis of numerical data of modeling of the LF–MF–HF radio wave propagation over the “ice-sea” stratified medium within the range of 100–5000 kHz (attenuation function W , electromagnetic field level E).

2. Electrical properties of seawater and ice

Let us consider the electrical characteristics of sea water and ice. Electric conductivity of water σ_w depends on its mineralization. For salt water σ_w varies within 0.3–15 S/m. Electrical resistivity of the White and Barents Seas water varies within 0.3 to 0.4 Ohm·m ($\sigma_w = 2.5\text{--}3.33$ S/m). Dielectric permeability of water ε_w weakly depends on its mineralization and varies within 87–80 at a temperature of 1–20 °C. Frequency dependence of σ_w and ε_w of water is manifested only at frequencies $f \geq 100$ MHz. Ice is considered as an isotropic semi-conducting layer with a relatively complex dielectric permeability $\varepsilon_{ci} = \varepsilon_i + i60\lambda\sigma_i$, its thickness is $h_i \leq \lambda$, where λ is air wavelength. In scientific literature there is limited experimental data obtained in various seas of the Arctic and the Antarctic as well as in other aquatic areas [1, 2]. There is freshwater ice and sea ice. Electrical conductivity of ice σ_i depends on temperature, frequency and presence of admixtures. Within the 10 kHz – 100 MHz range σ_i does not depend on frequency and is determined by ice density. Values of σ_i get into the $10^{-4}\text{--}10^{-6}$ S/m interval. The electrical conductivity of sea ice is higher than that of freshwater ice by 1–2 orders. With the air temperature about 0 °C value of σ_i of ice significantly depends on the quantity of melt water. The dielectric permeability of ice ε_i depends on density, frequency, temperature and pressure. For sea ice ε_i is within 3–9 and depends on the temperature and salinity, large values are characteristic of high temperature and salinity. Thickness of sea ice depends on its age. For permanent pack ice the thickness equals 3–5 meters. For first-year ice, according to the literature, mean thickness in the area of Zhokhov Island equals (1.3 +/- 0.4) m. The maximum thickness of sea ice is equal to 6–7 meters. The obtained values of σ_i and ε_i are used for taking into account the ice layer during calculations of radio wave propagation on ice thickness maps¹ or geoelectric sections (GES), as well as for assessment of the influence of seasonal variations of electro physical parameters σ_i and ε_i of ice medium on radio wave propagation paths.

¹ <http://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-ee-missions>

3. Surface impedance of the “ice-sea” stratified medium

The surface impedance of the stratified medium δ is determined as a ratio of tangential components of the electric E_τ and magnetic H_τ fields on the horizon “air-stratified medium” $\delta = E_\tau / (H_\tau Z_0)$ [3, 4]. In the LF–MF–HF radio wave ranges the ice layer renders a significant influence on the surface impedance. Therefore such structure should be considered as a two-layer “ice-sea” or three-four-layer with the presence of a snow layer and bottom soil. Let us consider the surface impedance δ of ice-covered sea for typical electrical properties and thicknesses of ice. In the LF–MF–HF range the 0.6–6 meters thick ice layer may be considered thin [1]. Let us take for calculations a two-layer model medium “ice-sea” with typical ice parameters $\sigma_i = 10^{-4}$ S/m, $\varepsilon_i = 4$. For seawater let us take $\varepsilon = 86$, $\sigma = 4$ S/m [1].

The calculations show that the ice layer with the accepted values σ_i and ε_i considerably changes a value of the surface impedance of the “ice-sea” stratified medium: increases the impedance module $|\delta|$ and shifts the φ_δ phase towards highly inductive impedances (to -88°). In LF–MF ranges and low-frequency area of SF range (on frequencies up to 5 MHz for ice thickness up to 6 meters) the ice-covered aquatic fields satisfy the impedance conditions since the condition $|\delta|^2 \ll 1$ is met. For the two-layered medium with highly contrasting properties such as “dielectric on conductor” the following ratio is correct:

$$\delta(h_i) = \text{Re } \delta - i \left(|\text{Im } \delta| + \frac{2\pi h_i}{\lambda} \right) \approx \delta_w - ikh_i,$$

where $\text{Re } \delta$ and $\text{Im } \delta$ are related to seawater without ice layer. Due to the presence of a thin weakly conductive ice layer on a highly conductive seawater medium an additive ikh_i component emerges in the impedance of the two-layered medium. It linearly depends on the thickness of a dielectric layer (ice) and shifts the impedance phase into the highly inductive area (Table 1). Thus, the frequency dependencies of the “ice-sea” structure impedance show that radio wave propagation over the ice-covered sea paths has peculiarities, characteristic of highly inductive paths due to the appearance of SEW.

Table 1.

$h_{\text{ice}}, \text{ m}$	300 kHz		1000 kHz		2000 kHz	
	$\text{Re } \delta$	$\text{Im } \delta$	$\text{Re } \delta$	$\text{Im } \delta$	$\text{Re } \delta$	$\text{Im } \delta$
0	0.00182	-0.00182	0.0033	-0.0033	0.0047	-0.0047
1	0.00182	-0.0081	0.0034	-0.0243	0.0048	-0.047
2	0.00184	-0.0144	0.0034	-0.0454	0.0051	-0.089
3	0.00184	-0.0207	0.0036	-0.0666	0.0058	-0.133
4	0.00188	-0.027	0.0038	-0.088	0.0069	-0.179

4. Calculation results of radio wave propagation over the “ice-sea” homogeneous impedance radio path and their analysis

The methodology of calculation of the attenuation function W of the surface wave field over the impedance paths is thoroughly described in scientific works [3, 4]. It is based on the following main methods of calculation of the attenuation function W of the surface wave field: 1) a row of normal waves (V. A. Fock’s row) [5]; 2) the Kalinin–Feinberg formula [6]; 3) the Hufford integral equation [7]; 4) the Fienberg integral equation [6]. Let us consider calculations of the attenuation function over the “ice-sea” impedance path within the range of 100–5000 kHz.

The vertical component of the electric field strength E_V at a distance R on the spherical surface of the Earth is represented in the form $E = E_0W$, where E_0 – the electric dipole field strength, which is located on a flat, infinite conductive surface, the W – attenuation function. The transmitter and receiver are located at the ice surface. The calculations adopted radiated power of 1 kW. The dependence of the field on the time taken in the form of the function $\exp(-i\omega t)$. Module of the electric field $|E_V|$ is associated with the attenuation function module $|W|$ formula:

$$|E_{V[mV/m]}| = \frac{300\sqrt{P}}{R} |W(R)|$$

where P is the radiated power, kW; R is the distance from the source to the reception point, measured along the surface of the Earth, km. Calculation of the attenuation function W for a spherical Earth held in a number of V. A. Fock’s row [5]:

$$W(x, y, q) = \sqrt{i\pi x} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{e^{ixt_s}}{t_s - q^2} \frac{w(t_s - y)}{w(t_s)}$$

Here $x = \frac{R}{a} \left(\frac{ka}{2}\right)^{\frac{1}{3}}$, $y = \left(\frac{2}{ka}\right)^{\frac{1}{3}} kh$, $q = i\delta \left(\frac{ka}{2}\right)^{\frac{1}{3}}$, where a is the radius of the Earth;

δ is normalized surface impedance of the radio path; h is the height of the signal reception point over the ice surface; t_s parameters are the roots (zeros) of the transcendental equation:

$$w'(t) - qw(t) = 0,$$

where $w(t)$ and $w'(t)$ are Airy’s function defined by the Airy’s equation $w''(t) - tw(t) = 0$, and its derivative, respectively [5].

From the theory of radio wave propagation over stratified media [3, 4] it follows that the SEW appears over the paths with highly inductive impedance. This wave, exponentially decaying in height, represents a practical interest since its energy decreases in inverse proportion to distance from the source, while the

energy of the extensional electromagnetic wave decreases in inverse proportion to squared distance from the source. The attenuation function W over a highly-inductive flat path contains the term $W_{surf} = 2i\sqrt{\pi SR}e^{-SR}$ corresponding to the surface wave. The maximum of the surface wave equal to $|W_{surf}| = 2\sqrt{\pi|S|Re}^{-kR|\text{Im}\delta|\text{Re}\delta}$ is observed at a distance of $R_{max} = \frac{\lambda}{4\pi \text{Re}\delta|\text{Im}\delta|}$. The comparison of the Fock's row-

derived numerical data for the attenuation function and the level of the field for a homogeneous “ice-sea” path with the surface impedance considered above and ice thickness from 0.6 to 2.7 meters at the distances of up to 2000 km showed (Figs. 1a, b, c) that the conditions of radio wave propagation over the ice-covered sea paths with highly-inductive surface impedance are more favorable than over a homogeneous conducting sea surface due to the emergence of SEW. On Fig. 1 the graphs $|W|$ and field level E over the “ice-sea” radio path on the frequencies of 300 (a), 500 (b) and 1000 (c) kHz at distances from the transmitter of up to 2000 km are presented. On Fig. 2 and 3 similar graphs grouped by frequency of 1500 kHz (distance up to 1000 km) and 2 and 5 MHz (distance up to 300 km) are presented. From these graphs it is plainly seen that the emergence of SEW over ice-covered sea paths and distances of its existence far away from an transmitter significantly depend on frequency. This can well be traced on the example of 2 MHz frequency represented on Fig. 3a. If on the 300 and 500 kHz frequencies the field over a 2000-km ice path is always higher than the field over the homogeneous well-conducting sea surface, then at the 1000 to 1500 kHz frequencies this excess takes place at the distances from 500 to 150 km. Let us note a considerable similarity of $|W|$ graph forms on the frequencies of 300–500 kHz (Fig. 1a, b) as well as frequencies from 1.5 to 5 MHz. On the frequencies from 2 to 5 MHz the range (distance) of SEW emergence significantly decrease to 10–50 km. However $|W|$ grows and reaches values $|W| = 4$. These ranges seemingly have no prospects of use in Arctic radio lines. However, they can efficiently be used for local search-and-rescue and search radio communication network and navigation at drifting stations. It requires the development of portable transmitter-receivers with efficient and ultra-compact antenna devices.

Let us carry out an analysis of spatial dependence of $|W|$ on various frequencies. From the graphs on Figs. 1–3 it follows that starting from 300 kHz frequency and higher $|W|$ has an SEW-characteristic spatial maximum $|W|_{max}$ at R_{max} distances. In Table 2 the estimated values $|W|_{max}$ and R_{max} are presented with the change in ice thickness from 0.6 to 2.7 m. From Table 2 it follows that on the 300–5000 kHz $|W|_{max}$ grows with the increase of ice thickness. However, in doing so R_{max} increases linearly only on 300 and 500 kHz frequencies. On the

frequencies from 300 to 500 kHz R_{\max} does not exceed 160 km and sharply decreases to 1 km on the frequency of 5000 kHz with ice thickness of 2.7 m. Consequently, the most favorable conditions of radio wave propagation over the ice paths will be in the frequency range from 300 to 1000–2000 kHz.

Table 2.

h, m	300 kHz		500 kHz		1000 kHz		5000 kHz	
	$ W _{\max}$	$R_{\max},$ km	$ W _{\max}$	$R_{\max},$ km	$ W _{\max}$	$R_{\max},$ km	$ W _{\max}$	$R_{\max},$ km
0.6	1.025	27	1.055	45	1.2	74	2.69	16
1.0	1.05	50	1.12	69	1.44	111	3.32	7
1.5	1.09	67	1.23	105	1.8	131	3.77	4
2.0	1.14	95	1.35	131	2.1	116	3.88	2
2.7	1.23	128	1.56	160	2.33	81	3.9	1

In Table 3 the space domain of SEW existence ($|W| > 1$) is presented depending on a frequency and ice thickness. The range of the SEW radio lines on ice paths increases with the increase of ice thickness on 300 and 500 kHz frequencies and reaches 580 km. On frequencies from 2000 to 5000 kHz the SEW radio lines range considerably shrinks with the increase of ice thickness. This frequency range is characterized by poor radio wave propagation conditions over ice paths at great distances. The obtained numerical results should be taken into account for selecting operation frequency of LW-MW radio-positioning and communications systems in Arctic regions.

In Table 4 the Fock's row calculations of the attenuation function's module $|W|$ and field level E on the 500 kHz frequency at the distances of 100, 200, 500, and 1000 km from an transmitter depending on an ice layer thickness with the emitted power of 1 kW. The analysis of numerical data testifies to the fact that the conditions of radio wave propagation over ice paths due to the emergence of SEW are more favorable than over the open sea. For instance, at the distance of 500 km the field level over the sea is $E = 180 \mu\text{V/m}$ and over the "ice-sea" path with ice thickness of 2 m is $E = 530 \mu\text{V/m}$.

The increase of the field level is equal to 2.95 times. At the 1000-km distance this increase already reaches 6.4 times.

A comparison of the Fock's row-derived numerical data for $|W|$ and field level for the homogeneous "ice-sea" path with ice thickness from 0.6 to 2.7 meters at the distances of up to 2000 km showed that with the highly-inductive surface impedance the radio wave propagation conditions over ice paths depend on the frequency and distance from an transmitter. With $|W| > 1$, significantly depending in the range of 100–5000 kHz on the frequency, the propagation conditions are more favorable than over the homogeneous ideally conducting surface. The modeling results indicate a strong influence of ice cover on radio wave propagation in LF–MF–SF ranges.

Table 3. Space domain of SEW existence depending on the frequency and ice layer thickness

h, m	100 kHz	500 kHz	800 kHz	1 MHz	1,5 MHz	3 MHz	5 MHz
	<i>R, km</i>	<i>R, km</i>	<i>R, km</i>	<i>R, km</i>	<i>R, km</i>	<i>R, km</i>	<i>R, km</i>
0.6	36	117	177	219	316	167	49
1.0	53	200	307	378	400	93	30
1.5	77	311	462	491	273	59	18
2.0	101	428	536	430	174	38	10
2.	138	580	495	277	108	23	6

Table 4.

h_{ice} , m	100 km		200 km		500 km		1000 km	
	$ W $	E , mV/m	$ W $	E , mV/m	$ W $	E , mV/m	$ W $	E , mV/m
0	0.89	2.7	0.73	1.1	0.31	0.18	0.05	0.015
0.6	1.02	3.0	0.89	1.23	0.44	0.26	0.095	0.028
1	1.11	3.3	1.0	1.5	0.55	0.33	0.14	0.042
1.5	1.22	3.7	1.16	1.73	0.71	0.43	0.22	0.067
2	1.35	4.0	1.32	1.98	0.89	0.53	0.32	0.097
2.7	1.53	4.6	1.55	2.33	1.13	0.68	0.47	0.14

5. Conclusion

According to the results of numerical data of the modeling of conditions of radio wave propagation within the range of 100–5000 kHz (attenuation function W , electromagnetic field level E) over the stratified “ice-sea” medium the efficiency assessment of communication channels and navigation in the Arctic regions was carried out. The results of the modeling displayed a strong influence of the ice layer on the LF–MF–SF range radio wave propagation. The electromagnetic field of a vertical electric dipole over the ice surface of the sea with the highly-inductive impedance may considerably exceed the field over the sea without ice due to the emergence of SEW. The values of the attenuation function’s module $|W|$ exceeding 1 and reaching $|W| = 4$, which are due to SEW, were obtained. With $|W| > 1$ the propagation conditions are more favorable than over a homogeneous conducting sea surface. In the course of analysis of the numerical data for $|W|$ and field level E on the paths with ice thickness from 0.6 to 2.7 meters it was established that with the highly-inductive surface impedance the LW–MW–SW radio wave propagation conditions over the ice paths depend on frequency, ice thickness and distance from an transmitter.

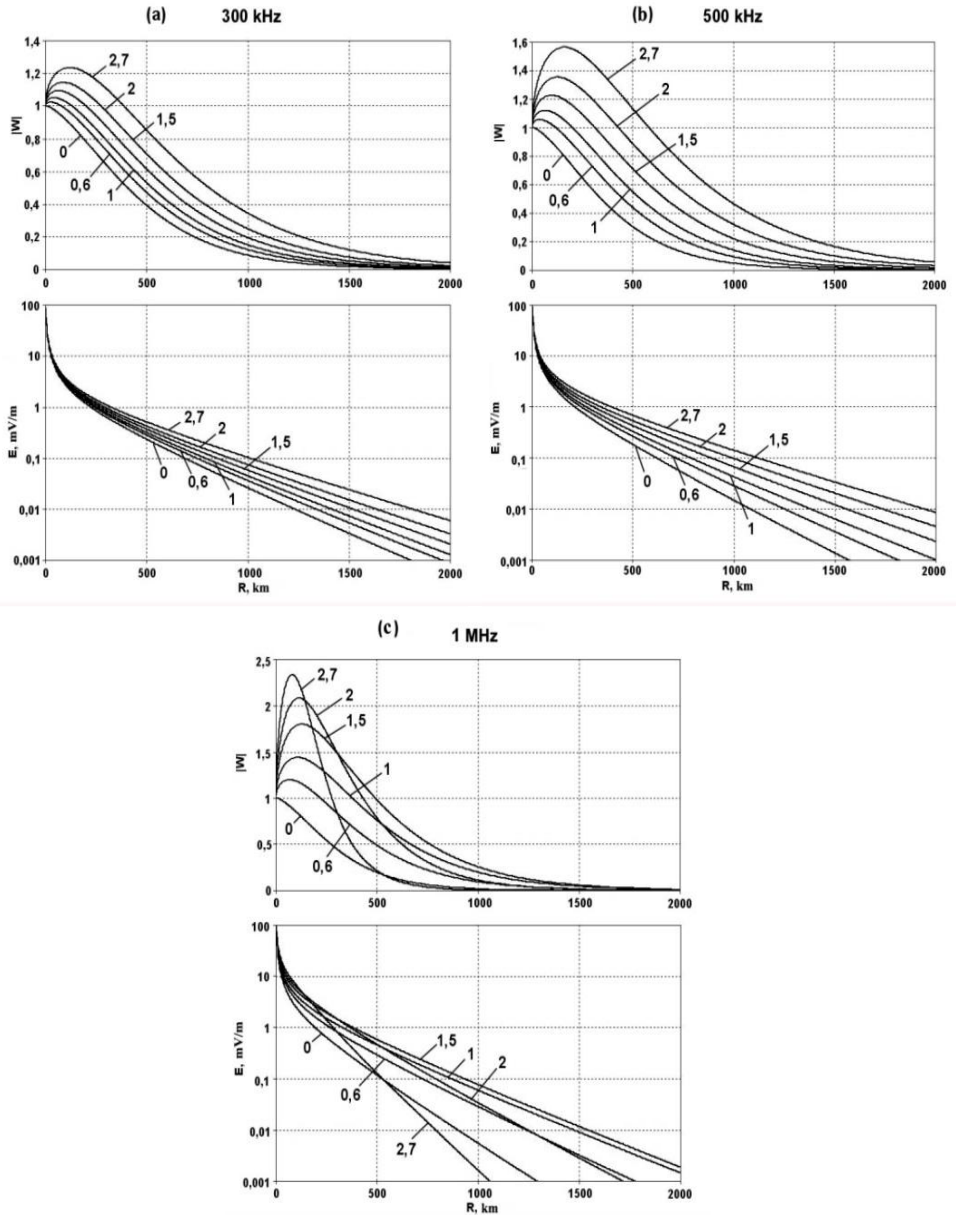


Fig. 1. Graphs $|W|$ and field level E over the radio path “ice-sea” on the 300 (a), 500 (b), and 1000 (c) kHz frequencies at the distance of up to 2000 km from an transmitter (numbers on graphs indicate ice thickness in meters)

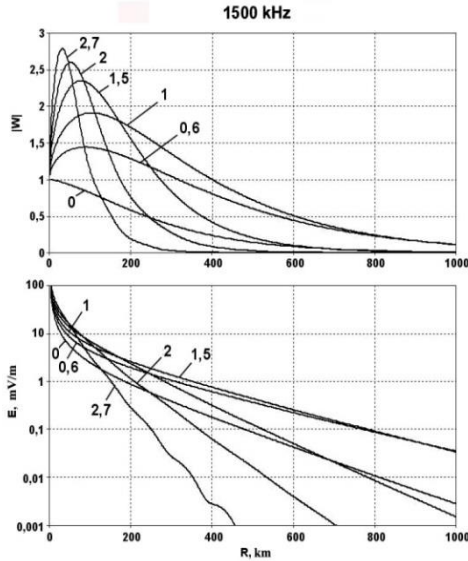


Fig. 2. Graphs $|W|$ and field level E over the radio path “ice-sea” on the 1500 kHz at the distance of up to 1000 km from an transmitter (numbers on graphs indicate ice thickness in meters)

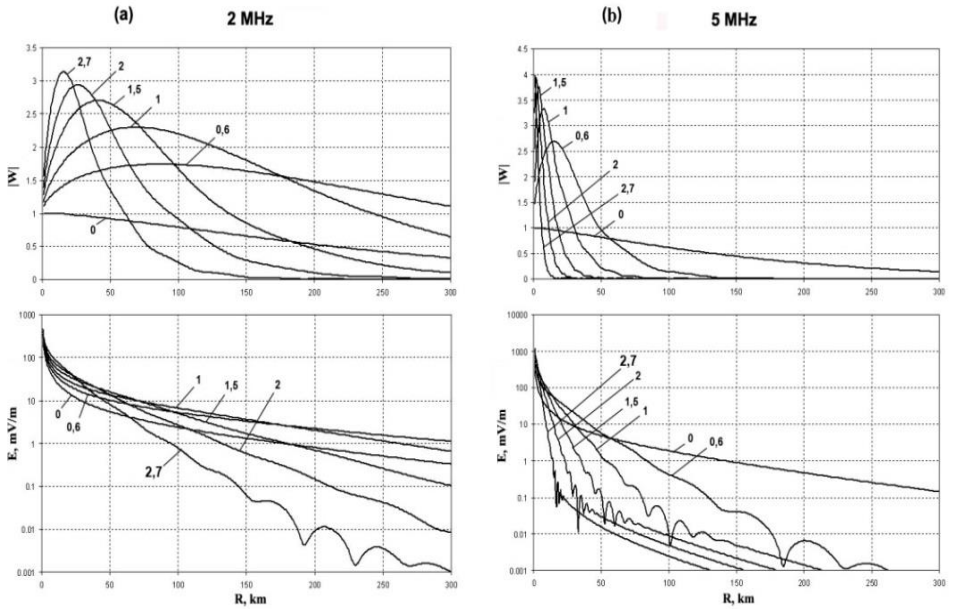


Fig. 3. Graphs $|W|$ and surface wave field level E over the “ice-sea” radio path on the 2 (a) and 5 (b) MHz

References

- [1] Yu. B. Bashkuev, *Electrical properties of natural layered media*, Novosibirsk : SB RAS publishing house, 1996. (In Russ).
- [2] Yu. B. Bashkuev, V. B. Khaptanov, and M. G. Dembelov, “Experimental proof of the existence of a surface electromagnetic wave,” *Technical Physics Letters*, vol. 36. no. 2, pp.136–139, 2010, doi: 10.1134/S1063785010020136.
- [3] G. I. Makarov, V. V. Novikov, and S. T. Rybachek, *Propagation of electromagnetic waves over the Earth’s surface*, Moscow : Nauka, 1991. (In Russ).
- [4] J. R. Wait, *Electromagnetic waves in stratified media*, Pergamon Press, Oxford-Paris, 1962.
- [5] V. A. Fock, *Problems of diffraction and electromagnetic wave propagation*, Moscow : Soviet Radio publishing house, 1970. (In Russ).
- [6] E. L. Feinberg, *Radio wave propagation over Earth’s surface*, Moscow : Fizmatlit publishing house, 1999. (In Russ).
- [7] G. A. Hufford, “An integral equation approach to the problem of wave propagation over an irregular surface,” *Quart. of Appl. Math.*, vol. 9, pp. 391–404, 1952.

Information about the authors

Yuri B. Bashkuev, senior doctorate, head of laboratory, Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation. ORCID 0000-0002-7102-3977.

Mikhail G. Dembelov, Ph.D., scientific researcher, Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation. ORCID 0000-0002-7281-4252.

УДК 621.3.095.3, 621.396.67.095

Разработка математической модели для учета влияния морской среды на распространение магнитного поля в системах беспроводной связи

¹ Широков И. Б., ² Редькина Е. А., ³ Сердюк И. В.

Севастопольский государственный университет

ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация

¹ *shirokov@ieee.org*

² *elenaredkina@gmail.com*

³ *serdyuk_igor@mail.ru*

Получено: 12 декабря 2022 г.

Отрецензировано: 10 января 2023 г.

Принято к публикации: 20 января 2023 г.

Аннотация: В статье предложена математическая модель для учета влияния электропроводящей среды на распространение магнитного поля в задаче реализации беспроводной связи под водой, то есть в среде с высоким затуханием электрической составляющей электромагнитного поля. Приведены результаты моделирования зависимости затухания от расстояния амплитуды напряженности магнитного поля в свободном пространстве и в поглощающей среде на частоте 3 МГц. Планируется провести экспериментальные исследования для уточнения модели.

Ключевые слова: беспроводная связь, магнитно-индукционная связь, мобильные сенсорные системы, электропроводящие среды.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Широков И. Б., Редькина Е. А., Сердюк И. В. Разработка математической модели для учета влияния морской среды на распространение магнитного поля в системах беспроводной связи // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 1. С. 63—69.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Широков, И. Б. Разработка математической модели для учета влияния морской среды на распространение магнитного поля в системах беспроводной связи / И. Б. Широков, И. В. Сердюк, Е. А. Редькина // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 1. — С. 63—69.

1. Введение

Вопросами распространения радиоволн в проводящих средах, в том числе морской воде, занимаются уже достаточно давно. Известно, что ра-

диоволны очень низкой частоты могут проникать на глубину до сотен метров. Однако для формирования современных каналов связи для задач морского интернета вещей, а также задач причаливания, требуются новые методы и новые подходы. Например, применение магнитного поля для формирования канала передачи информации.

В статье рассмотрен вопрос разработки математической модели, которая бы позволила учесть влияние электропроводящей морской среды на распространение магнитного поля, формируемого в канале передачи информации под водой.

2. Моделирование

На рис. 1 представлен канал передачи на основе магнитно-индукционной связи, где источником магнитного поля выбрана многovitковая катушка индуктивности, а приемная катушка располагается в указанной на рисунке расчетной области. Подобная модель позволяет определить, на какой дальности можно обеспечить передачу информации при заданной чувствительности приемной катушки. Данная модель может быть дополнена для учета влияния электропроводной среды на распространение магнитного поля.

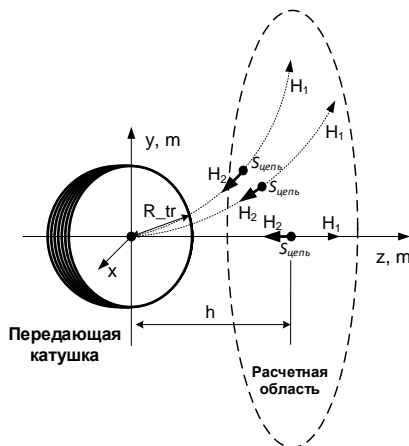


Рис. 1. Модель распространения магнитного поля в поглощающей среде.

Fig. 1. Model of magnetic field propagation in an absorbing medium

С учетом экранирующих свойств морской воды [1], можно сделать предположение, что в каждой точке пространства в модели канала связи располагается некий гипотетический резонансный контур (рис. 2), в котором под воздействием распространяющегося магнитного поля от переда-

ющей катушки формируется ток индукции, соответствующий реальным макроскопическим вихревым токам. Размер и положение этой катушки будет определяться параметрами среды и направлением магнитного поля от передающей катушки.

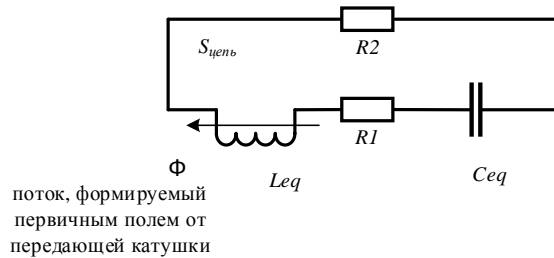


Рис. 2. Электрическая модель поглощающей среды в каждой точке пространства.

Fig. 2. Electrical model of an absorbing medium at each point in space

Подобные предположения о применении эквивалентных схем для оценки влияния воды на распространение радиоволн уже делались в [2]. В этой работе частотная характеристика воды представлялась в виде частотной характеристики RC -цепи с резонансной частотой порядка 10—20 ГГц.

Если применить предложенную в [2] эквивалентную схему, то параметры RC -контура, определяющие потери (тангенс угла потерь) в среде, составят: $R1 = 0,085$ Ом, $R2 = 53$ кОм и $C1 = 100$ пФ. С учетом того, что резонансная частота поглощения морской воды составляет порядка 2,4 ГГц, значение вводимой в модель эквивалентной индуктивности составит 43,976 пГн.

Оценим влияние морской среды на распространение магнитного поля с применением уточненной математической модели. Для этого определим напряженность магнитного поля от передающей антенны (многовитковой катушки индуктивности радиусом $R_{tr} = d_{tr}/2$) на ее оси на расстоянии h по приближенной формуле, как суммарное поле от N_{tr} витков катушки с током амплитудой I_m :

$$H(h, f, t) = \sum_{i=1}^{N_{tr}} \frac{\pi R_{tr}^2 I_m \sin(2\pi f t)}{2\pi [R_{tr}^2 + (h + d_{tr} + id_{tr})^2]^{3/2}}.$$

На основании первичного поля в свободном пространстве может быть произведен расчет вторичного магнитного поля в расчетных точках пространства как результата влияния сформировавшихся макроскопиче-

ских вихревых токов в морской среде (тока от одного витка эквивалентной индуктивности).

Поскольку ток в эквивалентной катушке индуктивности зависит от ее геометрических параметров, была проведена оценка этих параметров и найден радиус витка и его мнимая толщина из выражения [3]

$$L_{eq}(r_{eq}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_S dS \oint_l \frac{\mu}{r_{eq}^3} [d\mathbf{l} \mathbf{r}]_{\mathbf{n}},$$

где S — площадь витка, μ_0 — магнитная проницаемость воздуха, μ — относительная магнитная проницаемость среды, $\mathbf{r}_{\mathbf{n}}$ — нормаль к контуру, r_{eq} — радиус витка.

Полученные значения геометрических параметров катушки составили $r_{eq} = 4,96$ мм и $a_{eq} = 4,13$ мм.

Значение наведенного вихревого тока было определено из соотношения

$$I_{eq}(h, f, t) = \frac{\varepsilon_{eq}(h, f, t)}{Z_{eq}(f)},$$

где $\varepsilon_{eq}(h, f, t)$ — ЭДС электромагнитной индукции, полученная как отрицательное значение дифференциала магнитного потока через виток эквивалентной катушки; $Z_{eq}(f)$ — сопротивление эквивалентного колебательного контура (рис. 2) на частоте передачи в канале связи (частоте первичного магнитного поля).

Зная соотношение для вихревого тока в каждой точке пространства, рассчитаем напряженность вторичного магнитного поля на оси передающей катушки на расстоянии h , считая ток на эквивалентной катушке в виде одного витка:

$$H_2(h_2, f, t) = \frac{\pi r_{eq}^2 I_{eq}(h, f, t)}{2\pi (r_{eq}^2 + (h_2 + 2a_{eq})^2)^{3/2}}.$$

В формуле h_2 — расстояние от эквивалентной катушки.

Таким образом, результаты расчета амплитуды напряженности $H_1(h)$ первичного магнитного поля от передающей многovitковой катушки индуктивности и вторичного магнитного поля $H_2(h)$, порождаемого вихревым током на расстоянии $h = 0,1$ м от передающей антенны, рассчитанное на общей оси передающей катушки и эквивалентной катушки, показаны на рис. 3 а), 3 б).

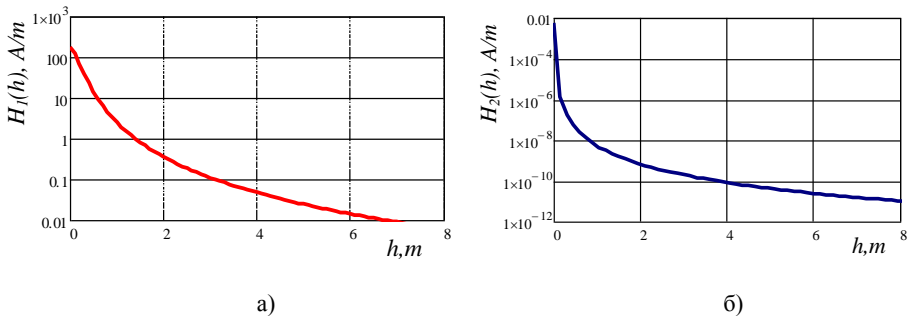


Рис. 3. Результаты расчета магнитного поля от передающей антенны вдоль ее оси в свободном пространстве (а) и вторичного магнитного поля в точке h из-за влияния среды (б).
 Fig. 3. The results of calculating the magnetic field from the transmitting antenna along its axis without the influence of the propagation medium (a) and secondary magnetic field from the medium, calculated on the point h (b)

Сравнение распространения магнитного поля в свободной и поглощающей среде в децибелах показано на рис. 4, на котором показано не относительное затухание сигнала, а выигрыш в его уровне на различных частотах.

Из рис. 4 видно, что влияние морской среды на распространение магнитного поля не велико для относительно низких частот моделирования. На относительно высоких частотах проигрыш в уровне сигнала достигает 60 дБ, что уже оказывается неприемлемым для целей и задач установления беспроводной связи под водой.

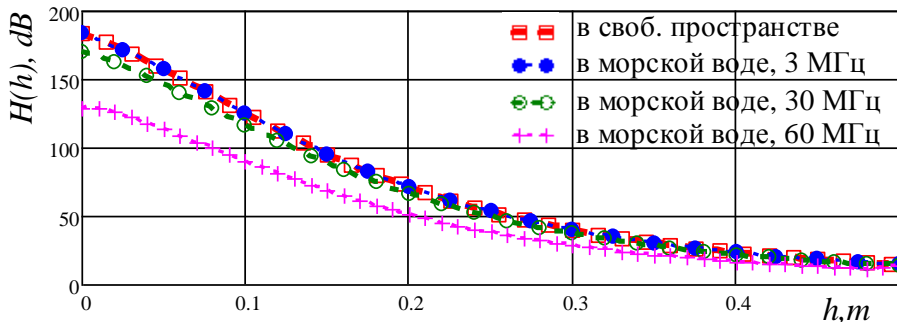


Рис. 4. Сравнение результатов расчета амплитуды напряженности магнитного поля в свободном пространстве и в поглощающей среде на разных частотах.
 Fig. 4. The comparison of results of calculating the amplitude of magnetic field in air and sea (absorbing medium) on the different frequencies

4. Заключение

Таким образом, в статье предложена математическая модель для учета влияния электропроводящей среды (морской воды) на распространение магнитного поля в системах беспроводной связи под водой. Показано, что влияние среды на низких частотах невелико, однако модель необходимо уточнить после проведения экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Показеев К. В., Чаплина Т. О. Океанология. Оптика океана : учебное пособие для вузов. — Москва : Юрайт, 2022. 270 с.
2. Хиппель А. Р. Диэлектрики и волны. Москва : Иностранная литература, 1960. 439 с.
3. Яворский В. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. Москва : Физматгиз, 1963. 848 с.

Информация об авторах

Широков Игорь Борисович, профессор Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0001-6425-5385.

Редькина Елена Александровна, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0002-8840-9550.

Сердюк Игорь Владимирович, доцент Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация.

Development of a Mathematical Model to Take into Account the Influence of the Marine Environment on the Propagation of a Magnetic Field in Wireless Communication Systems

I. B. Shirokov¹, Ye. A. Red'kina², and I. V. Serdyuk³

Sevastopol State University

33, Universitetskaya Str., Sevastopol, Russian Federation, 299053

¹ *shirokov@ieee.org*

² *elenaredkina@gmail.com*

³ *serdyuk_igor@mail.ru*

Received: December 14, 2022

Peer-reviewed: January 10, 2023

Accepted: January 20, 2023

Abstract: *The article proposes a mathematical model for taking into account the influence of an electrically conductive medium on the propagation of a magnetic field in the problem of implementing wireless communication under water, that is, in an environment with high attenuation of the electrical component of the electromagnetic field. The results of modeling the dependence of the attenuation on the distance of the amplitude of the magnetic field strength in free space and in an absorbing medium at a frequency of 3 MHz are presented. It is planned to conduct experimental studies to refine the model.*

Keywords: *wireless communication, magnetic-inductive communication, mobile sensor systems, electrically conductive media.*

For citation (IEEE): I. B. Shirokov, Ye. A. Red'kina, and I. V. Serdyuk, "Development of a Mathematical Model to Take into Account the Influence of the Marine Environment on the Propagation of a Magnetic Field in Wireless Communication Systems," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 63–69, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.06. (In Russ.).

References

- [1] K. V. Pokazeyev, T. O. Chaplina, *Oceanology. Optics of the ocean*. Moscow : Yurayt, 2022.
- [2] A. R. Hippel, *Dielectrics and Waves*. New York : Wiley; London : Chapman and Hall, 1954.
- [3] V. M. Yavorsky and A. A. Detlaf, *Handbook of Physics*. Moscow : Fizmatgiz, 1963.

Information about the authors

Igor B. Shirokov, Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0001-6425-5385.

Yelena A. Red'kina, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0002-8840-9550.

Igor V. Serdyuk, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation.

УДК 621.373.826:616.62-003.7

Формирование многофакторного критерия оценки эффективности использования лазерных технологий в урологии

¹ Чернега В. С., ² Арбузов И. А.

¹ Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация
vs_chernega@mail.ru

² Городская больница № 9
ул. Мира, 5, Севастополь, 299018, Российская Федерация
arbizov-007@mail.ru

Получено: 9 мая 2023 г.

Отрецензировано: 15 мая 2023 г.

Принято к публикации: 19 мая 2023 г.

Аннотация: Проведен выбор факторов, влияющих на эффективность и безопасность выполнения операции дробления мочевых камней с помощью гольмиевого и тулиевого волоконного лазеров, обоснована и выполнена их нормализация. Сформирован и проанализирован многофакторный интегральный критерий эффективности лечения мочекаменной болезни методом лазерной литотрипсии. Приведены рекомендации по использованию лазеров для дробления мочевых камней.

Ключевые слова: твердотельные и волоконные лазеры, контактная лазерная литотрипсия, многофакторный критерий эффективности лечения.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Чернега В. С., Арбузов И. А. Формирование многофакторного критерия оценки эффективности использования лазерных технологий в урологии // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 1. С. 70—80.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Чернега, В. С. Формирование многофакторного критерия оценки эффективности использования лазерных технологий в урологии / В. С. Чернега, И. А. Арбузов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 1. — С. 70—80.

1. Введение

Одним из самых распространенных урологических заболеваний является мочекаменная болезнь (МКБ), при которой образуются мочевые

камни (конкременты), представляющие собой неорганические соединения кальция, магния, натрия. В современной урологии наиболее эффективным методом лечения МКБ является дробление мочевых конкрементов специальными устройствами — литотриптерами, которые построены на основе квантовых генераторов различного типа. В настоящее время наиболее широко применяется литотриптеры, созданные на основе гольмиевого и тулиевого лазеров [1—4].

В качестве рабочего тела в гольмиевых лазерах используется алюмоиттриевый гранат, легированный ионами редкоземельного элемента гольмия *Ho:YAG* (*Holmium:yttrium-aluminum-garnet*). Источником накачки служит ксеноновая или криптоновая импульсная лампа, излучающая белый свет в широком спектральном диапазоне. Типовыми параметрами гольмиевого лазера являются: длина волны оптических колебаний 2100 нм; максимальная мощность излучения 30 Вт; энергия импульсов может регулироваться от 0,2 до 6 Дж; частота импульсов может устанавливаться от 3 до 25 Гц, а длительность импульсов — от 150 до 850 мкс.

В тулиевых волоконных лазерах *TFL* (*Thulium Fiber Laser*) рабочим телом является кварцевое оптическое волокно, легированное ионами тулия (*Tu₂O₃*). Сердцевина волокна имеет диаметр 10—20 мкм, а его длина варьируется в пределах от 10 до 30 м. В качестве источника оптической накачки используется один или несколько мощных лазерных диодов. Длина волны излучаемого колебания в волоконных тулиевых лазерах равна 1940 нм. Выполнение литотрипсии при длине волны 1940 нм существенно повышает качество проведения операции. Это связано с тем, что поглощение энергии инфракрасных колебаний при такой длине волны в 4,5 раза выше, чем у гольмиевого *Ho:YAG* лазера с длиной волны 2100 нм и в 2,3 выше, чем у твердотельного лазера с рабочим телом на основе *Tm:YAG*. Влияние конструктивных параметров гольмиевых и тулиевых лазеров на клинические характеристики лечения МКБ подробно освещены в [2, 3].

Эффективность лечения МКБ в настоящее время оценивается в основном коэффициентом полного освобождения пациента от камней *Esfr* [4, 5], определяемого как количество операций *Nsfr*, при которых осуществляется полное удаление камней и их фрагментов, по отношению к общему количеству литотрипсий *Nsum*:

$$Esfr = (Nsfr / Nsum) \cdot 100 \% . \quad (1)$$

В зарубежной литературе этот критерий носит название «*Stone Free Rate*», сокращенно *SFR*.

Однако коэффициент E_{sfr} оценивает эффективность не всего процесса лечения МКБ, а лишь одной из его, хотя и весьма важной, составляющих — эффективность собственно процедуры дробления камня.

Целью настоящей работы является выявление и оценка других факторов и формирование многофакторного критерия эффективности, которые бы отражали не только эффективность выполненной операции, но и качество жизни прооперированного, а также финансовые затраты лечебного учреждения.

2. Выявление и нормализация факторов интегрального критерия эффективности

В работе [6] была впервые предпринята попытка оценить эффективность лечения МКБ с помощью многофакторного интегрального критерия. Однако в этой статье преимущественно рассматривались медицинские аспекты эффективности лечения МКБ без строгого обоснования нормализации факторов и оценки весовых коэффициентов.

К интегральному показателю эффективности лечения МКБ предъявляются следующие требования:

- 1) учет всех существенных факторов, оказывающих влияние на протекание процесса лечения;
- 2) однозначность оценки при различных способах литотрипсии;
- 3) управляемость;
- 4) возможность широкого применения при различных способах литотрипсии;
- 5) простота в математическом смысле, позволяющая использовать его во врачебной практике.

Интегральный критерий эффективности F_{umm} целесообразно представить в виде взвешенной суммы частных критериев (факторов) Φ_i с учетом важности частных критериев F_i [7]:

$$F_{umm} = \sum_{i=1}^K w_i \Phi_i = \sum_{i=1}^K F_i, \quad (1)$$

где K — количество учитываемых факторов; w_i — весовые коэффициенты, учитывающие важность (весомость) вклада i -го критерия в суммарный показатель; F_i — взвешенный i -й частный критерий. Более важному критерию приписывается больший вес, а общая важность всех критериев принимается равной 1, т. е.:

$$\sum_{i=1}^K w_i = 1.$$

При этом произведения $F_i = w_i \Phi_i$ в выражении (1) следует упорядочивать по мере убывания весов, т. е. более важным весам предписывается меньший индекс. Эффективность лечения МКБ считается тем выше, чем больше значение взвешенной суммы частных критериев F_i .

Для определения факторов, влияющих на суммарную эффективность лечения МКБ, был проведен опрос экспертов, который осуществлялся методом анкетирования [6]. По результатам опроса экспертов выделены следующие факторы, оказывающие влияние на общий интегральный показатель лечения МКБ:

Фактор Φ_1 — относительная доля больных с полным удалением конкрементов — «*Stone Free Rate*» (*SFR*);

Фактор Φ_2 — средняя длительность операции;

Фактор Φ_3 — наличие интра- и/или постоперационных осложнений;

Фактор Φ_4 — среднее количество койко-дней нахождения больного в лечебно-профилактическом учреждении (ЛПУ).

Факторы записаны в порядке их важности: самым важным фактором считается Φ_1 , а фактор Φ_4 имеет минимальную важность.

При вычислении численного значения показателя $F_{инт}$ следует учитывать, что все частные факторы F_i отличаются по размерности и диапазону принимаемых значений. Поэтому при формировании интегрального критерия применяются не абсолютные значения частных критериев, а нормированные. Процедура нормирования представляет собой отношение абсолютного значения частного критерия к некоторой нормирующей величине.

По степени влияния на интегральный показатель лечения МКБ эти факторы существенно различаются. Так увеличение фактора Φ_1 приводит к росту интегрального показателя, а факторы Φ_2 — Φ_4 могут оказывать обратное влияние, т. е. при определенных значениях факторов Φ_2 — Φ_4 общая эффективность лечения МКБ уменьшается. Поэтому при формировании нормирующих выражений для частных факторов нужно составлять их таким образом, чтобы при отклонении абсолютных значений частных факторов Φ_2 — Φ_4 от средних показателей в большую сторону нормированные факторы становились отрицательными, а при отклонении в меньшую сторону — положительными.

С учетом вышеизложенного фактор Φ_2 — (средняя длительность операции) в нормированном виде может быть представлен как разница между средней среднестатистической длительностью операции литотрипсии определенным типом литотриптера для данного ЛПУ и фактическим временем длительности операции, отнесенную к среднестатистической длительности:

$$\Phi_2 = \frac{T_{\text{до_ср}} - T_{\text{до_факт}}}{T_{\text{до_ср}}} \times 100\% ,$$

где $T_{\text{до_ср}}$ — среднее значение длительности операции;
 $T_{\text{до_факт}}$ — фактическая длительность выполненной операции литотрипсии.

Как видно из выражения, если фактическая длительность операции окажется меньше средней, то фактор Φ_2 будет положительным числом и тем самым будет способствовать повышению показателя интегральный эффективности. Если же фактическая длительность операции превысит среднее значение по отделению (по клинике, региону), то фактор Φ_2 примет отрицательное значение и понизит интегральный показатель.

Фактор Φ_3 в нормированном виде может быть представлен как разница между единицей и удвоенным значением коэффициента осложнений. Математически это можно выразить следующей формулой:

$$\Phi_3 = (1 - 2K_{\text{осл}}) \times 100\% ,$$

где $K_{\text{осл}}$ — коэффициент осложнений, зависящий от степени (класса) осложнения по шкале *Clavien–Dindo* [8].

Коэффициент осложнений может принимать значения от 0 до 1. В работе [6] предложено использовать нелинейную шкалу коэффициента осложнения: коэффициент равен 0 при отсутствии осложнений; 0,2 — при осложнениях 1 степени; 0,5 — при второй степени; 0,75 — при осложнениях степени 3а; 0,8 — осложнениях степени 3б; 0,9 — при осложнениях 4 степени и 1 — при летальном исходе. Множитель 2 перед коэффициентом осложнений выбран таким образом, чтобы при отсутствии осложнений ($K_{\text{осл}} = 0$), фактор Φ_3 был равен 100 % и прибавлялся со своим весовым коэффициентом к интегральному показателю эффективности, а при наличии осложнения 5-й степени ($K_{\text{осл}} = 1$) фактор Φ_3 равнялся минус 100 %, т. е. вычитался со своим весовым коэффициентом из общего показателя эффективности.

Фактор Φ_4 в нормированном виде может быть представлен как разница между средним количеством койко-дней после литотрипсии и фактическим (действительным) значением затраченных койко-дней на лечение больного, отнесенная к среднему количеству койко-дней. При таком определении этого фактора, если реальное количество койко-дней будет меньше среднего, то фактор Φ_4 будет повышать интегральную интенсивность, в противном случае — снижать. Математически это можно выразить следующей формулой:

$$\Phi_4 = \frac{N_{\text{ккд_ср}} - N_{\text{ккд_факт}}}{N_{\text{ккд_ср}}} \times 100\% ,$$

где $N_{\text{ккд_ср}}$ — среднестатистическое количество койко-дней пребывания больного при лечении МКБ в стационаре; $N_{\text{ккд_факт}}$ — фактическое количество койко-дней пребывания больного в стационаре.

Факторы Φ_2 — Φ_4 являются знакопеременными, а фактор Φ_1 условно положительным. Поэтому для оптимизации интегрального критерия следует выбирать тип лазера и задавать параметры излучения таким образом, чтобы обеспечивать максимум фактора Φ_1 и положительные значения Φ_2 — Φ_4 . Исследованиями ряда авторов [3, 9, 10] установлено, что при эквивалентных установках параметров лазерного излучения скорости разрушения в режиме распыления (энергия импульсов 0,2—0,5 Дж, частота 8—80 Гц) кальций-оксалатных мочевых камней (*calcium oxalate monohydrate*) тулиевым волоконным литотриптером примерно в три раза выше, чем гольмиевым и в 2,5 раза выше при распылении уратных (*uric acid*) камней. В режиме фрагментации (0,6—0,8 Дж, частота 6—10 Гц) уратных камней скорость тулиевой литотрипсии оказалась в два раза выше, чем гольмиевой. Очевидно, что длительность операции при увеличении скорости дробления камней будет снижаться. Поэтому для повышения фактора Φ_2 следует применять тулиевую литотрипсию.

При задании параметров лазера следует учитывать следующие обстоятельства. Снижение времени дробления конкрементов может быть достигнуто за счет повышения энергии и частоты следования импульсов лазера. Однако, с одной стороны, превышение энергии излучения выше некоторого предела приводит к возникновению явления ретропульсии, которое характеризуется отскакиванием камня от наконечника оптического зонда и потерей контакта с ним. В результате этого резко снижается эффективность разрушения камня [11]. Для восстановления контакта требуются дополнительные затраты времени, что приводит к увеличению длительности литотрипсии. С другой стороны, превышение энергии импульсов выше определенного уровня приводит к деградации (обгоранию) наконечника оптического зонда и невозможности продолжения процесса дробления [12]. В этом случае требуется операция зачистки наконечника волокна или его полной замены. Это в свою очередь увеличивает длительность процедуры литотрипсии. В работе [13] обоснованы оптимальные значения энергии и частоты следования импульсов тулиевого волоконного лазера, которые минимизируют длительность процедуры дробления камня. Оптимальными значениями энергии и частоты лазерного излучения

при тулиевой литотрипсии в режиме распыления являются соответственно 0,2 Дж, 80 Гц, а в режиме фрагментации 0,8 Дж, 20 Гц.

О преимуществах применения тулиевого волоконного лазера для лечения мочекаменной болезни свидетельствуют и особенности поглощения энергии лазерных колебаний в водной среде. Длина волны излучаемого колебания в волоконных тулиевых лазерах равна 1940 нм, на которой наблюдается максимальная степень поглощения энергии инфракрасных колебаний водой при 22 °С. Это в 4,5 раза выше, чем степень поглощения колебаний гольмиевого *Ho:YAG* лазера с длиной волны 2100 нм. Со степенью поглощения связана глубина оптического проникновения в мягкие ткани человеческого организма и их разрушения (коагуляции). Так, в гольмиевых *Ho:YAG*-лазерах глубина оптического проникновения достигает 400 мкм, а в волоконных тулиевых она составляет всего лишь около 15 мкм. Благодаря этому коэффициент осложнений при тулиевой волоконной литотрипсии $K_{осл}$ существенно ниже, что приводит к увеличению фактора Φ_3 и соответственно повышению интегрального коэффициента эффективности лечения МКБ в целом.

При сравнении эффективности лечения МКБ субъектов m и n (двух клиник или двух хирургов) может возникнуть ситуация, когда $F_{инт}^m$ и $F_{инт}^n$ окажутся равными. Здесь верхние индексы m и n обозначают номер сравниваемых субъектов. Например, интегральный критерий эффективности первого лечебного учреждения равен 77 % $F_{инт}^1 = (43 \ 2 \ 24 \ 8)$, а интегральный критерий эффективности второго тоже оказался равным 77 % $F_{инт}^2 = (38 \ 6 \ 18 \ 15)$. Как в таком случае определить, в каком из лечебных учреждений эффективность лечения выше, т. е. какой из интегральных критериев $F_{инт}^1$ или $F_{инт}^2$ является более предпочтительным?

Для определения из двух сравниваемых критериев более предпочтительного $F_{инт}^m$ или $F_{инт}^n$ целесообразно представлять их в виде векторов-строк, компонентами которых являются частные критерии F_i . Затем осуществлять попарное сравнение частных критериев F_i^m и F_i^n .

В результате сравнения формируются два вектора предпочтения P^m и P^n :

$$P^m = p_1^m + p_2^m + \dots + p_K^m$$

и

$$P^n = p_1^n + p_2^n + \dots + p_K^n.$$

Компоненты вектора предпочтения являются бинарными числами, которые находятся из условия:

$$p_i^m = 1, \text{ если } F_i^m > F_i^n \text{ и } p_i^m = 0, \text{ если } F_i^m < F_i^n .$$
$$p_i^n = 1, \text{ если } F_i^n > F_i^m \text{ и } p_i^n = 0, \text{ если } F_i^n < F_i^m .$$

Отсюда следует, что вектор P^n представляет собой K -разрядное двоичное число, инверсное двоичному числу P^m . Причем крайний левый разряд является старшим в связи с расположением в (1) частных критериев по убыванию.

Таким образом, если в результате сравнения оказалось, что число $P^m > P^n$, то более эффективным является критерий $F^m_{\text{итм}}$.

Для приведенного выше примера вектор предпочтения $P^1 = 1010$ (десятичный эквивалент 10) больше вектора $P^2 = 0101$ (двоичный эквивалент 5). В этом случае принимается решение, что более эффективным критерием лечения МКБ является $F^1_{\text{итм}}$.

3. Заключение

Проведена систематизация, формализация и нормализация факторов интегрального критерия эффективности, оказывающих влияние на итоговую эффективность лечения мочекаменной болезни методом контактной лазерной литотрипсии. Показано, что более высокая эффективность достигается при использовании тулиевого волоконного лазера.

Предложена методика определения более предпочтительного критерия оценки интегральной эффективности лечения мочекаменной болезни при сравнении эффективности лечения МКБ в двух лечебных учреждениях и при численном равенстве показателей.

Интегральный показатель эффективности лечения МКБ может найти широкое применение в урологической практике, так как он позволяет учитывать не только качество удаления мочевых конкрементов, но и вероятность возникновения послеоперационных осложнений, сказывающихся на стоимости лечения и качестве жизни больного. В дальнейших исследованиях предполагается оценить влияние на показатель интегральной эффективности квалификации хирурга, выполняющего литотрипсию.

Список литературы

1. Мартов А. Г., Диамант В. М., Борисик А. В. и др. Сравнительное исследование эффективности электроимпульсного и лазерного литотриптеров in vitro // Урология. 2013. № 2. С. 70—78.
2. Чернега В. С., Еременко А. Н. Особенности использования твердотельных лазеров при лечении мочекаменной болезни // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 3. С. 287—295.

3. Чернега В. С., Арбузов И. А. Влияние конструктивных особенностей волоконного тулиевого лазера на клинические характеристики литотриптера // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2021. Т. 4, № 1. С. 31—41.
4. Uygun I., Okur M., Aydogdu B. et al. Efficacy and safety of endoscopic laser lithotripsy for urinary stone treatment in children // Urol. Res. 2012. Vol. 40, no. 6. P. 751—755.
5. Коган М. И., Белоусов И. И., Ясине А. М. Эффективность контактной уретеролитотрипсии в лечении крупных камней проксимального отдела мочеточника // Вестник урологии. 2019. Т. 7, № 1. С. 12—25.
6. Арбузов И. А., Феофилов И. В., Рахимов С. А., Чернега В. С. Интегральный критерий оценки эффективности лечения мочекаменной болезни методом литотрипсии // Вестник урологии. 2022. Т. 10, № 4. С. 5—12.
7. Подиновский В. В. Идеи и методы теории важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. М. : Наука, 2019. 103 с.
8. Mitropoulos D., Artibani W., Graefen M. et al. Reporting and Grading of Complications after Urologic Surgical Procedures: an ad hoc EAU guidelines panel assessment and recommendations // Eur Urol. 2012. Vol. 61, no. 2. P. 341—349.
9. Andreeva V., Vinarov A., Yaroslavsky I. et al. Preclinical comparison of superpulse thulium fiber laser and a holmium:YAG laser for lithotripsy // World J. Urol. 2020. Vol. 38, no. 2. P. 497—503.
10. Попов С. В., Орлов И. Н., Сытник Д. А. и др. Сравнение клинической эффективности гольмиевой и тулиевой уретеролитотрипсии // Экспериментальная и клиническая урология. 2020. № 4. С. 30—34.
11. Kamal W., Kallidonis P., Koukiou G. et. al. Stone Retropulsion with Ho:YAG and Tm:YAG Lasers : A Clinical Practice-Oriented Experimental Study // Journal of Endourology. 2016. Vol. 30, No. 11. P. 1145—1149.
12. Hutchens T. C., Gonzalez D. A., Irby P. B., Fried N. M. Fiber optic muzzle brake tip for reducing fiber burnback and stone retropulsion during thulium fiber laser lithotripsy // J. Biomed. Opt. 2017. Vol. 22, no. 1. Art. 018001.
13. Чернега В. С., Арбузов И. А. Оптимизация параметров тулиевого волоконного лазера при проведении трансуретральной контактной литотрипсии // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2022. № 4. С. 281—282.

Информация об авторах

Чернега Виктор Степанович, к. т. н., доцент кафедры «Информационные системы» Севастопольского государственного университета, г. Севастополь, Российская Федерация. ORCID 0000-0001-5054-0396.

Арбузов Игорь Анатольевич, заведующий урологическим отделением городской больницы № 9, г. Севастополь, Российская федерация. ORCID 0000-0002-6652-0231.

Formation of a Multifactorial Criterion for Efficiency Evaluation of Use Laser Technologies in Urology

V. S. Chernega¹ and I. A. Arbuzov²

¹ *Sevastopol State University*
Universitetskaya Str. 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation
vs_chernega@mail.ru

² *Department of Urology of City Clinical Hospital № 9*
Mira Str. 5, Sevastopol, 299018, Russian Federation
arbuzov-007@mail.ru

Received: May 9, 2023

Peer-reviewed: May 15, 2023

Accepted: May 19, 2023

Abstract: *The factors formation the efficiency and safety of urinary stone crushing using holmium and thulium fiber lasers were selected, substantiated and normalized. A multifactorial integral criterion of urolithiasis treatment efficiency by laser lithotripsy was formed and analyzed. Recommendations are given for the use of lasers for crushing urinary stones.*

Keywords: *solid-state and fiber lasers, contact laser lithotripsy, multifactorial criterion of treatment effectiveness.*

For citation (IEEE): V. S. Chernega and I. A. Arbuzov, "Formation of a Multifactorial Criterion for Efficiency Evaluation of Use Laser Technologies in Urology," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 70–80, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.07. (In Russ.).

References

- [1] A. G. Martov, V. M. Diamant, A. V. Borisik, A. S. Andronov, and D. A. Dzhililov, "Comparative evaluation of efficacy of electropulse and laser lithotriptors in vitro," *Urologiia*, no. 2, pp. 70–78, 2013. (In Russ.).
- [2] V. S. Chernega and A. N. Eremenko, "Features of use of Solid State Lasers in the treatment of urolithiasis", *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 3, pp. 287–295, 2020. (In Russ.).
- [3] V. S. Chernega and I. A. Arbuzov, "Influence of design features of thulium fiber laser on clinical characteristics of lithotripter", *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 1, pp. 31–41, 2021. (In Russ.).
- [4] I. Uygun, M. H. Okur, B. Aydogdu, Y. Arayici, B. Isler, and S. Otcu, "Efficacy and safety of endoscopic laser lithotripsy for urinary stone treatment in children," *Urological Research*, vol. 40, no. 6, pp. 751–755, Jul. 2012, doi: <https://doi.org/10.1007/s00240-012-0495-x>.

- [5] M. I. Kogan, I. I. Belousov, and A. M. Yassine, "Efficiency of contact ureterolithripsy in treatment of proximal ureteral large stones," *Urology Herald*, vol. 7, no. 1, pp. 12–25, 2019. (In Russ.). DOI: 10.21886/2308-6424-2019-7-1-12-25.
- [6] I. A. Arbuzov, I. V. Feofilov, S. A. Rakhimov, and V. S. Chernega, "Integral criterion for estimation the effectiveness of lithotripsy-treated urolithiasis," *Urology Herald*, vol. 10, no. 4, pp. 5–12, 2022. (In Russ.). DOI: 10.21886/2308-6424-2022-10-4-05-12.
- [7] V. V. Podinovskiy, *Ideas and methods of the theory of the importance of criteria in multicriteria decision making problems*. Moscow : Nauka, 2019.
- [8] D. Mitropoulos, W. Artibani, M. Graefen, M. Remzi, M. Roup r t, and M. Truss, "Reporting and Grading of Complications After Urologic Surgical Procedures : An ad hoc EAU Guidelines Panel Assessment and Recommendations," *European Urology*, vol. 61, no. 2, pp. 341–349, Feb. 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2011.10.033>.
- [9] V. Andreeva et al., "Preclinical comparison of superpulse thulium fiber laser and a holmium:YAG laser for lithotripsy," *World Journal of Urology*, vol. 38, no. 2, pp. 497–503, May 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s00345-019-02785-9>.
- [10] S. V. Popov, I. N. Orlov, D. A. Sytnik, M. M. Suleimanov, A. V. Emelianenko, E. A. Grin, and I. Yu. Pestryakov, "Comparison of the clinical efficacy of holmium and thulium ureterolithotripsy," *Experimental and Clinical Urology*, vol. 13, no. 4, pp. 30–34, 2020. (In Russ.). DOI: 10.29188/2222-8543-2020-13-4-30-34.
- [11] W. Kamal et al., "Stone Retropulsion with Ho: YAG and Tm: YAG Lasers: A Clinical Practice-Oriented Experimental Study," *Journal of Endourology*, vol. 30, no. 11, pp. 1145–1149, Nov. 2016, doi: <https://doi.org/10.1089/end.2016.0212>.
- [12] T. C. Hutchens, D. A. Gonzalez, P. B. Irby, and N. M. Fried, "Fiber optic muzzle brake tip for reducing fiber burnback and stone retropulsion during thulium fiber laser lithotripsy," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 22, no. 1, p. 018001, Jan. 2017, doi: <https://doi.org/10.1117/1.jbo.22.1.018001>.
- [13] V. S. Chernega and I. A. Arbuzov, "Optimization of the parameters of a thulium fiber laser during transurethral contact lithotripsy," *Microwave and Telecommunication Technology*, no. 4, pp. 281–282, 2022. (In Russ.).

Information about the authors

Viktor S. Chernega, Associate Professor on Department of Information Systems. Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0001-5054-0396.

Igor A. Arbuzov, Head of the Department of Urology of City Clinical Hospital No. 9, Sevastopol, Russian Federation. ORCID 0000-0002-6652-0231.

УДК 621.37-621.39(091)

Ртутные газоразрядные лампы Гарольда Арнольда и их применение

Пестриков В. М.

*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения
ул. Правды, 13, Санкт-Петербург, 191119, Российская Федерация
rvm205@yandex.ru*

Получено: 12 декабря 2022 г.

Отрецензировано: 10 марта 2023 г.

Принято к публикации: 20 марта 2023 г.

Аннотация: *В статье подробно описано создание первых устройств телефонной трансляции в WESo для будущей сверхдлинной телефонной линии Нью-Йорк — Сан-Франциско. Главное внимание акцентировано на разработке этих устройств на основе ртутных газоразрядных технологий сотрудником компании Гарольдом Арнольдом. Приведен анализ конструкций репитеров, существовавших до 1911 года. Дано обоснование выбранного научного направления по разработке репитеров в WESo. Рассмотрены конструкции ртутных газоразрядных ламп Питера Купера Хьюитта и ртутного дугового реле Джона Беллами Тейлора. Отмечено, что организация в WESo исследовательской группы по разработке репитеров на новых физических принципах и приглашение в эту группу молодых талантливых ученых позволило получить весомый научный результат.*

Ключевые слова: *телефонная линия Нью-Йорк — Сан-Франциско, телефонная трансляция, репитер, ртутные газоразрядные лампы, Питер Купер Хьюитт, ртутные газоразрядные лампы Гарольда Арнольда.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Ртутные газоразрядные лампы Гарольда Арнольда и их применение // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 1. С. 81—107.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Пестриков, В. М. Ртутные газоразрядные лампы Гарольда Арнольда и их применение / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 1. — С. 81—107.

1. Введение

В статьях [1, 2] была представлена история организации научно-исследовательской группы в *Western Electric Co.* по разработке конструкции нового типа телефонной трансляции для сверхдлинной телефонной

линии Нью-Йорк — Сан-Франциско. Для решения поставленной задачи руководство компании привлекло молодых ученых, выпускников университетов. Многие из них пришли в компанию по рекомендации известного физика Роберта Милликена из Чикагского университета. Первым сотрудником научно-исследовательской группы по рекомендации Милликена стал Гарольд Арнольд (*Harold De Forest Arnold*, 03.09. 1883—10.07.1933). В настоящей статье пойдет речь о выборе научного направления разработки телефонной трансляции и создании для этого соответствующих устройств на основе изобретенной им усилительной ртутной газоразрядной лампы. Рассматриваемая тема в отечественной и зарубежной научно-технической литературе в должной мере не освещена.

Начиная примерно с 1900 г. компания *Bell System* стала доминировать в области разработки телефонных ретрансляторов. Первым практическим ретранслятором было механическое устройство, изобретенное Х. Э. Шривом из *Western Electric Co.* Эта конструкция ретранслятора была доведена до стадии практического внедрения в эксплуатацию к 1906 году. С появлением экономической программы, учрежденной г-ном Вейлом в 1907 году, научно-исследовательские работы были значительно сокращены, но ретрансляторам по-прежнему уделялось большое внимание в попытке сделать их коммерчески более привлекательными. Было получено множество патентов на различные альтернативы и улучшения как в элементах, так и в схемах повторителей. Хотя усилия по разработке были в некоторой степени успешными и на телефонных линиях были установлены механические повторители, было очевидно, что повторители этого типа имеют почти непреодолимые недостатки.

Другой тип телефонного репитера, ламповый, появился в 1910 году. Этот репитер представлял собой триод *LRS*, наполненный парами ртути, конструкции группы немецких радиотехников, руководимой Робертом фон Либеном. К 1911 году триод *LRS* доказал свою пригодность для практических целей, в частности, усиления телефонных сигналов. Об этом триоде знали в *Western Electric Co.* из публикаций, а также, по слухам, что он использовался в Германии в качестве ретранслятора [3].

Следует отметить, что научные сотрудники *AT&T* не особо интересовались и поэтому не владели достаточной информацией о том, что в это время, кроме названных технологий, шло развитие радиоламповых технологий на базе аудиона Ли де Фореста. Вероятно, это было связано с тем, что Форест позиционировал свой аудион для беспроволочной телеграфии и телефонии, а не для проводных телефонных линий. Использование лампового триода *LRS* в качестве усилителя было продемонстрировано за несколько лет до того, как компания *De Forest* смогла это сделать. Немецкие

суды сочли это «новаторским изобретением». Было много патентных дел, но суд Лейпцига вынес решение в пользу Роберта фон Либена, и это решение не было обжаловано.

Исследование стоимости телефонного разговора, проведенное Фрэнком Джеветтом и его сотрудниками [4, р. 371], показало, что было бы экономически необоснованным пытаться совершить передачу телефонных сигналов по линии Нью-Йорк — Сан-Франциско, не разработав совершенно новый тип телефонного ретранслятора и не взяв его за тренд инновационного развития технологий дальней телефонной связи.

2. Выбор направления разработки репитера

В 1902 году американский инженер-электрик Питер Купер Хьюитт (*Peter Cooper Hewitt*, 05.05.1861—25.08.1921) показал в своих патентах возможность применения дугового разряда для усиления электрического сигнала [5]. Питер Хьюитт был широко известен тем, что разработал в 1900 г. первую успешную коммерческую газоразрядную ртутную лампу.

Известный британский физик Уильям Томсон (англ. *William Thomson, 1st Baron Kelvin*, 26.06.1824—17.12.1907) после своей поездки в США 1903 году сказал [6]: «Что меня больше всего привлекало в Америке, так это работы мистера Питера Купера Хьюитта и его вакуумные лампы». В начале XX века мировая пресса, в основном американская, причисляла к знаковым открытиям в мире науке три изобретения Хьюитта, каждое из которых должно было со временем существенно изменить условия нашей повседневной жизни [7]. Все три изобретения основывались на ртутных технологиях: вакуумная лампа, прерыватель для беспроволочной телеграфии и преобразователь переменного тока в постоянный ток (рис. 1). Питер Купер однажды сказал: «Я всегда планировал и изобретал, и никогда не был удовлетворен, если не делал что-то сложное и то, чего никогда раньше не делалось, если это было возможно» [6, р. 174].

В первой коммерческой лампе Хьюитта для генерации оптического излучения использовался газовый разряд в парах ртути, рис. 2 [8]. В стеклянной колбе лампы иногда могло быть до 1 кг ртути. Такая лампа люминисцирует, когда электрический ток проходит через пары ртути при низком давлении. Для зажигания разряда лампу Хьюитта необходимо было качнуть, чтобы свободно находившаяся в колбе ртуть перелилась и замкнула электроды, а затем разорвать образовавшуюся электрическую цепь. Только после этого вспыхивала электрическая дуга. Купер Хьюитт подробно изучил факторы, влияющие на работу лампы, такие как геометрия, электрические характеристики, количество ртути и т. д.

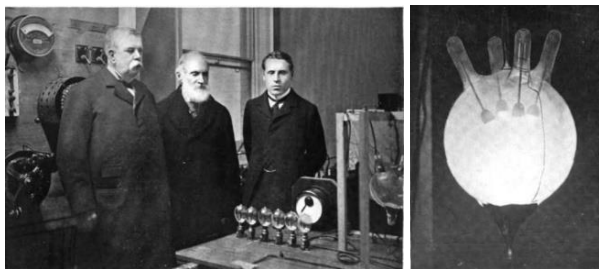


Рис. 1. Мистер Джордж Вестингауз, лорд Кельвин и мистер Чарльз Мерц на испытании статического преобразователя Хьюитта. Статический преобразователь в работе. Выставка в офисе британской компании «Вестингауз». 1903 г.

Fig. 1. Mr. George Westinghouse, Lord Kelvin, and Mr. Charles Merz at the trial of the Hewitt static converter. The static converter in operation. Exhibition in the office of the British company "Westinghouse". 1903

Лампа Хьюитта функционировала при отрицательном сопротивлении, погашая положительное сопротивление телефонной линии, поэтому для ее функционирования она должна была тщательно отрегулирована на индивидуальное сопротивление каждой линии, в противном случае устройство возбуждалось, производя свист на линии.

Ртутная лампа превосходила лампу накаливания того времени в отношении энергетической эффективности, но сине-зеленый свет, который она испускала, ограничивал ее применение. В быту эта лампа использовалась в одной люстре вместе с лампами накаливания с целью восполнить отсутствие красной составляющей света, рис. 2. В конце концов, лампа Хьюитта нашла свое место там, где нужен был яркий свет, а цветопередача не имеет значение, в частности, в фотостудиях, на киносъёмках и строительных площадках [9].

Несколько позже П. Хьюитт разработал индуктивный балласт для включения газоразрядных ламп. Балласт включался последовательно с лампой и служил для регулировки проходящего через нее тока. Исключительные права на использование ртутной дуги в проводной телефонии и телеграфии были защищены патентами Купера Хьюитта.

В мае 1902 года П. К. Хьюитт во время экспериментов в Нью-Йорке обнаружил, что на ионный ток газоразрядной лампы можно воздействовать внешним магнитным полем. На это ему был выдан патент US749791. Ионы на такое управление реагируют гораздо медленнее в сравнении с электронами в трубке Либена, что является его недостатком [10]. Однако принцип тот же. Питером Купером Хьюиттом было получено несколько патентов на конструкции дуговых ртутных ламп, в которых использовались различные методы управления электрической дугой [11, 12]. По су-

шеству в этих патентах были предложены идеи решения поставленных задач, но ни один патент с предложением по усилению электрического сигнала не был доведен до практической конструкции. Когда Купера Хьюитта спросили о его методе работы, он ответил, что у него нет ничего, кроме постоянства, за исключением: «Когда я совершенно озадачен, я иду заниматься, часто в какой-то другой области, и появляется что-то, что наводит на мысль связанной непосредственно с работой. Работайте над чем угодно, только продолжайте в том же духе».

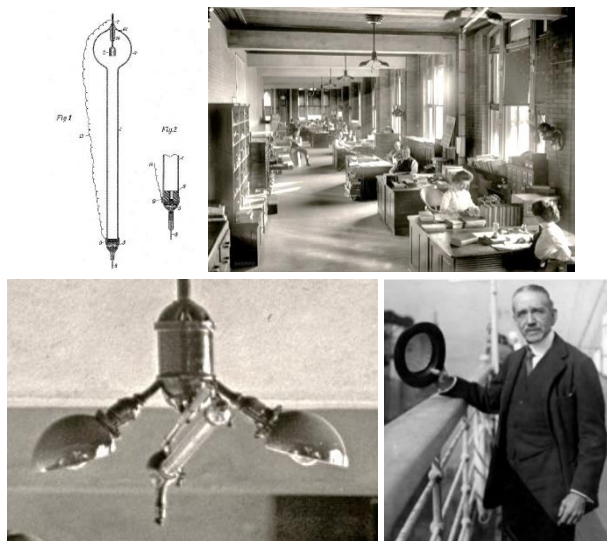


Рис. 2. Устройство первой коммерческой ртутной лампы Хьюитта (рисунок из патента US682690A с приоритетом от 5 апреля 1900 г.). Офис в Вашингтоне, 1912г. Под потолком висят две обычные лампы накаливания и длинная стеклянная лампа Хьюитта. Питер Купер Хьюитт (1918 г.).

Fig. 2. Arrangement of the first commercial Hewitt mercury lamp (drawing from US682690A patent with priority dated April 5, 1900). Washington office, 1912 Hanging from the ceiling are two ordinary incandescent lamps and a long glass Hewitt lamp. Peter Cooper Hewitt (1918)

Наиболее реальную конструкцию дугового усилителя звуковых колебаний предложил инженер-исследователь *General Electric Co.* в Скенектади Джон Беллами Тейлор ¹ (*John Bellamy Taylor*, 20.08.1875—20.12.1963). В 1910 году Дж. Тейлор получил патент на «Ртутное дуговое реле» (англ. *Mercury arc relay*), рис. 2 [13].

¹ Дж. Беллами Тейлор наиболее известен тем, что привлек международное внимание демонстрацией, которую он провел в 1931 году. Пока дирижабль парил над заводом GE в Скенектади, Тейлор создавал музыку с помощью луча света, который направлял на экран воздушного судна.

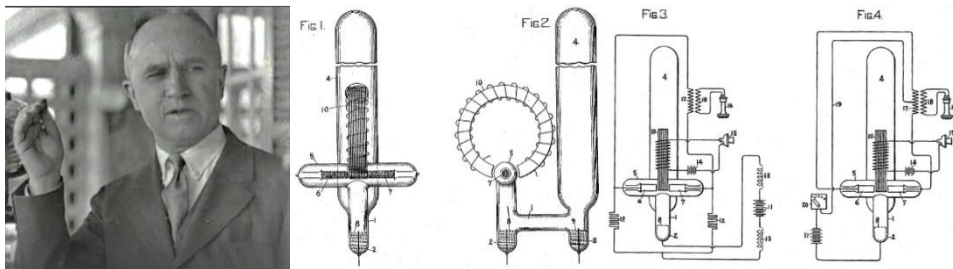


Рис. 2. Джон Тейлор. Ртутное дуговое реле. Рисунки из патента US953361A с приоритетом от 17 сентября 1907 г.

Fig. 2. John Bellamy Taylor. Mercury arc relay. Drawings from US953361A, priority September 17, 1907

В патенте US953361A Тейлора сказано [13]: «Настоящее изобретение относится к реле для использования в связи с электрическими цепями везде, где требуется воспроизвести или повторить в одной цепи электрический импульс или колебание, воздействующие на другие». Реле (рис. 2) состоит из двух анодов (6, 7) и ртутного катода (8) в вакуумированном сосуде, пускового анода (9) и источника тока (11). В реле предусмотрена возможность изменения распределения тока между двумя анодами для устойчивой работы реле. Устройство для воздействия (отклонения) на ток электрической дуги представляет собой электромагнит (10), полюса которого расположены так, чтобы создавать магнитный поток через ртутную дугу, возникающую между анодами и катодом. Если теперь говорить в микрофон (15), то звуковой ток изменит магнитный поток, создаваемый электромагнитом (10), и в результате произойдет соответствующее изменение тока в электрической дуге. Это изменение тока отразится в телефонной трубке (16) и таким образом реле усилит звуковой сигнал, как речевой, так и другие звуки. На Рис. 2: Fig. 1 представляет собой вид спереди одного из вариантов усовершенствованного реле; Fig. 2 — его вид сбоку; Fig. 3 и 4 — схемы, показывающие реле, используемое в телефонных цепях.

Интересно отметить причину, по которой концепция безынерционного электронного усилителя потребовала так много времени, прежде чем ее начали развивать другие исследователи. Джордж А. Кэмпбелл из бостонской лаборатории AT&T осознал эту необходимость еще в 1907 году. Последовавшая депрессия того года помешала активной работе над этой концепцией. Та же депрессия пришла в Англию и остановила разработку британских ламп на Исследовательской станции Почтового отделения (*Post Office Research Station*) в 1908 году. К счастью, финансовые ресурсы, которыми располагал немецкий радиотехник Роберт фон Либен, не повлияли на завершение его разработок в области электронных ламповых технологий.

Незвизрая на появление радиоламповых технологий, компания *AT&T* в поисках конструкции репитера, лишенной недостатков механического варианта репитера, в первую очередь обратила внимание на конструкции ртутных дуговых повторителей.

В 1910 году Кэмпбелл в служебной записке Банкрофту Герарди (*Bancroft Gherardi Jr.*, 06.04.1873—14.08.1941), в то время инженеру завода в *AT&T*, предложил компании изучить возможность разработки ретранслятора с вибрирующей частью, состоящей из молекул ртутного газа или катодных лучей (электронов) [14, р. 532]. Нет никаких доказательств того, что это предложение было одобрено.

К моменту образования в 1911 году исследовательской группы под руководством Эдвина Колпиттса, в *West Electric Company* сложилось научное мнение, что при разработке репитера для Трансконтинентальной линии связи необходимо использовать катодно-лучевые технологии. Проводниками этой точки зрения выступали Фрэнк Джеветт и Роберт Милликен [1, с. 417—419].

3. Начало научной деятельности Г. Арнольда в *AT&T*

Фрэнк Джеветт, получив прекрасные рекомендации о Гарольде Арнольде (*Harold De Forest Arnold*), решил с ним встретиться лично. Осенью 1910 года Джеветт вместе с Милликеном пришли в комнату Арнольда в лаборатории Райерсон² (*Ryerson Physical Laboratory*, рис. 3) в университете Чикаго, где Милликен представил Джеветта Гарольду Арнольду. Джеветт поговорил с претендентом о его работе в телефонной промышленности. При этом он подчеркнул [15], что телефонная промышленность нуждается в безынерционном ретрансляторе и что он уверен, что должно быть решение этой проблемы. А достижение поставленной цели должно быть осуществлено путем правильного использования электронных явлений, которые в то время в физических лабораториях были предметом самого интенсивного изучения. Доктор Джеветт спросил Арнольда, не согласится ли тот на работу в телефонной индустрии. На это предложение Арнольд ответил, что очень рад принять предложение, и к нему вернется, как только закончит экспериментальную работу, которой занимается.

² Физическая лаборатория Райерсона была построена в 1894 году. Лаборатория была самой современной для того времени. Здание было спроектировано так, чтобы оптимизировать экспериментальные условия, чтобы свести к минимуму внешние вибрации, которые могли бы помешать проведению экспериментов. Здание обладало исключительно прочной конструкцией и имело сверхтяжелый фундамент, тяжелые шиферные стеновые полки и каменные столбы для лабораторий первого этажа. Подвальные лаборатории были облицованы толстой пробкой для контроля уровня влажности.

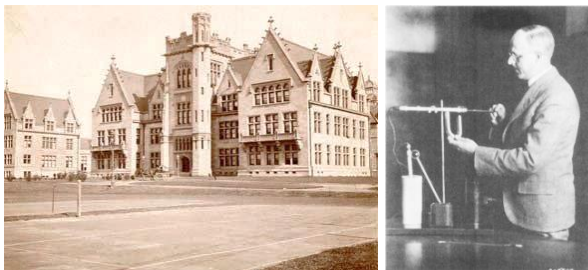


Рис. 3. Общий вид здания Физической лаборатории Райерсон в университете Чикаго (около 1900 г.). Гарольд Арнольд в лаборатории (конец 20-х гг. XX века).

Fig. 3. General view of the Ryerson Physics Laboratory building at the University of Chicago (circa 1900). Harold Arnold in the laboratory (late 1920s)

Арнольд после завершения исследований в Чикаго уехал в Нью-Йорк и явился на работу в инженерный отдел (*Engineering Department*) *Western Electric Company* во второй день января 1911 года. Он присоединился к исследовательской группе в производственном подразделении *West Electric Company*³, которая тогда входила в *AT&T*. Арнольд сразу же приступил к работе над телефонными ретрансляторами и погрузился в решение проблемы.

Примерно в апреле 1911 года Арнольд после консультации с доктором Джеветтом и заведующим лаборатории Колпитсом начал разработку телефонного ретранслятора с использованием ртутной дуги. Причина выбора ртутной газоразрядной лампы Хьюитта заключалась в том, что в тот период времени Г. Арнольд мало знал об аудионе. Об этом он вспоминал через 15 лет, когда уже усовершенствовал аудион и разработал репитер на электронной лампе [16, p. 556]: «Я был знаком с клапаном Флеминга, но никогда не пытался использовать его как практическое устройство. Мое знакомство ограничивалось изучением литературных источников. Я также был знаком с продолжительной серией дискуссий в журнале *Electrician* (*London*), которые вели между собой Флеминг и де Форест относительно того, кто был первым в этом вопросе. Исходя из этого, я знал об аудионе де Фореста только из прессы, и не мог понять, как работает аудион, а также для чего предназначена сетка в этом устройстве».

Использовать ртутную дугу в качестве телефонного ретранслятора было давним предложением, которое, как известно, было выдвинуто среди прочих Питером Купером Хьюиттом, но оно так и не оказалось, как было сказано выше, практически осуществленным.

³ Американская электротехническая компания *Western Electric Company* (иногда сокращенно *WE* или *WEC*) была в составе *AT&T* с 1881 по 1995 гг.

Арнольд тщательно изучил патенты Питера Купера Хьюитта, когда взялся за разработку ртутного дугового ретранслятора. Основной причиной такого подхода к делу явилось то, что эти патенты содержали лучшее описание существовавшей тогда технологии, которое он смог найти. Его отправной точкой в работе стало то, на чем закончилась работа Купера Хьюитта.

За основу своей будущей ртутной газоразрядной лампы Арнольд взял конструкцию лампы из патента Хьюитта US991304A, рис. 4а. В этой лампе электрическая дуга зажигается между положительным электродом 18 отрицательным электродом 2. Электрод 4 является дополнительным электродом и используется для запуска дуги. Особенностью лампы явилась конструкция электромагнитного узла (рис. 4б) для воздействия на электрическую дугу. Электромагнитный узел содержит металлический Т-образный сердечник с загнутыми внешними концами вовнутрь для непосредственного нахождения их близости к положительному электроду 18. Обмотка, на которую подается сигнал от микрофона 30, намотана на среднем стержне электромагнита. Воздействие электромагнитного поля передается на зажженную электрическую дугу, в цепь которой включена первичная обмотка трансформатора 10 с телефоном 9. Вторичная обмотка 11 указанного трансформатора соединена с телефонным приемником 12.

При таком схемном решении вызванные значительные изменения сопротивления парового устройства (дуга с парами ртути) приводят к изменению электрического тока в цепи дуги, которые и воспроизводятся в приемной цепи 9, 12. В патенте Хьюитта отмечено, что устройство в целом может служить в качестве реле, приспособленного для усиления звуковых эффектов, которые первоначально создаются перед микрофоном 8.

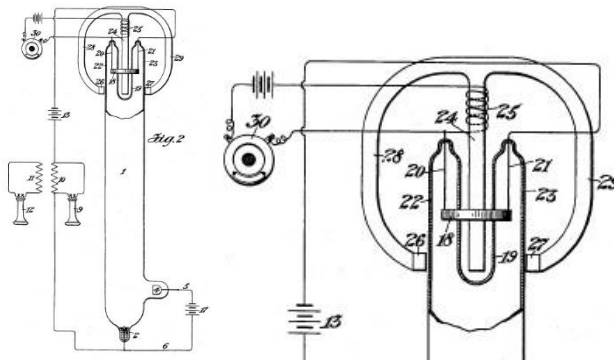


Рис. 4. Устройство для воспроизведения электрических колебаний.
Рисунки из патента П. К. Хьюитта US991304A с приоритетом от 7 июля 1904 г. [16]

Fig. 4. Means for reproducing electrical variations.
Drawings from P.C. Hewitt's patent US991304A with priority dated July 7, 1904. [16]

Арнольд досконально изучил само устройство для воспроизведения электрических колебаний Хьюитта (рис. 4) и работу электрической дуги в парах ртути. Это позволило ему сделать довольно хороший телефонный усилитель с использованием ртутной дуги. Главным отличием его устройства от конструкции Хьюитта стал не только внешний вид, но и конструкция камер, в одну из камер было включено нескольких различных электродов.

4. Ртутный газоразрядный звуковой усилитель Г. Арнольда

Давно было признано, что устройства с ртутной дугой работают стабильно только тогда, когда практически нет другого газа, кроме присутствия паров ртути. Питер Купер Хьюитт подчеркивал это в своих патентах [17]: «При изготовлении моей лампы важно, чтобы имеющаяся в ней камера была освобождена от вредных газов и веществ, а по окончании работы содержалось подходящее количество газа или газов с надлежащей плотностью. Этих результатов я добиваюсь, изготавливая лампу способом, который будет более подробно описан в связи с приложенным чертежом, на котором схематически изображена лампа, схемы и устройство для ее изготовления».

Для получения чистых паров ртути в дуговой трубке необходимо было не только вывести газ, находившийся в пространстве трубки, но и с большой осторожностью вывести газ, который был окклюдированный⁴ с внутренней стороны стеклянных стенок. Одна из причин, почему это так важно, заключалась в том, что ртутная дуга по своей природе работает при высокой температуре, и поэтому стеклянные стенки дуговой лампы во время нормальной работы нагреваются до температуры, при которой они могут ее выдержать не размягчаясь. Сама природа ртутной дуги такова, что в процессе ее работы автоматически создается хороший вакуум внутри камеры. Это связано с тем, что в трубке дуги находится масса ртути, а также горячий столб дуги. Ртуть испаряется и быстро проходит вверх в виде облака пара через трубку к насосу и вымывает все газы, которые могли остаться в трубке. Арнольд, несмотря на то, что ртутная дуга представляет собой хороший насос, для изготовления ртутного репитера использовал ртутный насос *Gaede*, который был в то время и оставался лучшим коммерческим ртутным насосом своего типа.

Арнольд в процессе работы консультировался у Питера Купера Хьюитта, который посоветовал и указал на необходимость удаления газов из электродов в трубке. Методика Купера Хьюитта была использована для

⁴ Окклюдированный (лат. окклюзия) — содержащийся, скрытый в твердом теле (о металле, о газе).

положительных и отрицательных электродов дуги. Этот метод заключался в пропускании большого тока через дугу для сильного нагрева электродов, что приводило к удалению из них газа. Откачка продолжалась до полного удаления газа из трубки. После этого дуга работала при нормальном значении тока, то есть при более низком значении, чем то, которое использовалось в существовавшем до этого процесса. Вакуум оставался хорошим, потому что электроды, как в процессе откачки, сильно не нагревались.

Арнольд экспериментировал с 1911 по 1912 гг. с молекулами ртутного пара (как было предложено ранее Кэмпбеллом) в поисках более легкой вибрирующей части, заменяющей механическую диафрагму в модели Шриве, и в конце концов разработал перспективную модель ртутного усилителя на основе работ Питера Купера Хьюитта.

Экспериментальный вариант усилителя, разработанный на основе этой лампы (рис. 4) обладал небольшим усилением, что принципиально подтверждало возможность построения на ртутной газоразрядной лампе Хьюитта пригодного для практической телефонии электронного ретранслятора. Арнольд, увидев итог своей работы, удивился; оказалось, что он разработал ретранслятор, совершенно отличный от того, что сделал Питер Купер Хьюитт. Руководство компании отметило в его работе использование фундаментальных патентов Купер Хьюитта и то, что, возможно, придется получить от того лицензию, чтобы использовать сделанное изобретение.

На разработку ртутного газоразрядного звукового усилителя Арнольд оформил заявки на получение двух патентов, которые подал 15 июля 1912 года. Один патент US1118172A на «Способ получения электрических колебаний» (англ. *Method of producing electrical variations*) [18], а второй US1118173A — на устройство под названием «Электрическое реле» (англ. *Electric relay*) [19]. Рисунки в обоих патентах одинаковые, различные только описания изобретений.

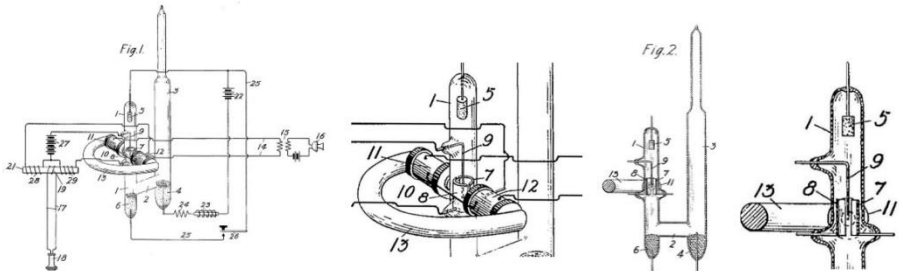


Рис. 4. Ртутный газоразрядный звуковой усилитель конструкции Гарольда Арнольда.
Рисунки из патента US1118172 приоритетом от 15 июля 1912 г.

Fig. 4. Mercury gas-discharge sound amplifier designed by Harold Arnold.
Drawings from US1118172 priority dated July 15, 1912

В патенте на «Способ получения электрических колебаний» сказано [18]: «Настоящее изобретение относится к области воспроизведения электрических колебаний; его целями являются обеспечение усиленного воспроизведения колебаний энергии тока, воспроизведение без искажений, чувствительность к малым токам, эффективность, надежность и бесшумная работа. Среди других применений изобретение применимо к телефонии с целью получения в исходящей цепи усиления голосовых токов, возникающих во входящей цепи».

При осуществлении этого изобретения используется принцип отклонения электромагнитом или другими подходящими средствами ионизированного потока, который может быть получен любым из множества способов. Ртутная дуга оказалась подходящим средством для этой цели. Изменения тока, которые необходимо воспроизвести или усилить, можно наложить на катушки электромагнита, расположенные таким образом, чтобы индуцированные в них изменения магнетизма вызывали соответствующие отклонения ионизированного потока.

Средство обнаружения по настоящему изобретению включает в себя использование вспомогательного контура, который не является дуговым по своему характеру и не зависит от контура для определения ионизированного потока, за исключением того, что он пересекает часть пара потока. Этот вспомогательный контур поддерживается посредством вспомогательного катода или пары таких катодов, которые погружены в поток и соединены с источником электродвижущей силы, который может быть отдельным от источника, создающего сам поток, при этом схема завершается анодом, который также может быть погружен в поток. Таким образом, в емкости вспомогательного катода или катодов создается электрическое поле, которое вызывает в вспомогательном контуре протекание тока, интенсивность которого направлена в зависимости от распределения ионизации в поле вспомогательного катода. На рис. 4 (Fig. 1) показана система схем и устройств, с помощью которых может быть осуществлен заявленный способ, а на рис. 4 (Fig. 2) показано в разрезе по высоте и поперечному сечению устройства из рис. 1 отдельно от цепей.

Формула изобретения содержит 4 пункта. Приведем из нее первый пункт, который в принципе отражает суть изобретения: «Способ воспроизведения электрических колебаний, который заключается в создании ионизированного потока, поддержании контура, включающего поперечный путь внутри указанного потока, приложения в точке внутри указанного пути переменной отклоняющей силы к указанному потоку и создании, таким образом, изменений тока в указанном контуре».

Как видно из рис. 4, средство для получения ионизированного потока, которое в данном случае показано как ртутно-дуговой аппарат, содержит основную камеру 1 с горизонтальным ответвлением 2 и конденсационную камеру 8 вместе с ртутным катодом 4, анодом 5 из углерода и пусковым ртутный анодом 6. Внутри основной камеры 1 установлена пара вспомогательных катодов 7, 8, которые показаны полуцилиндрическими по форме и имеющими возможность перемещения одного относительно другого и от стенок камеры. Между вспомогательными катодами вниз проходит вспомогательный анод 9. Вспомогательные катоды и вспомогательный анод изготовлены из платины.

В качестве средства отклонения ионизированного потока на рис. 1 показан электромагнит 10, который содержит две катушки 11, 12 с металлическими сердечниками. Одно основание каждой катушки обращено к противоположным сторонам основной камеры 1 в области вспомогательных катодов 7, 8 так, чтобы силовые линии между полюсными наконечниками проходили в направлении, поперечном направлению течения ионизированного потока в камере 1, и приводили к отклонению потока в сторону того или иного вспомогательного катода, в зависимости от направления тока в катушках магнитов.

В патенте на «Электрическое реле» [19] Арнольд классифицирует свое изобретение как релейное устройство для воспроизведения электрических колебаний (см. рис. 1). Цели изобретения указаны те же, что и в его патенте на «Способ получения электрических колебаний» [19]. Реле, воплощенное в этом изобретении, состоит из трех основных цепей: входной (микрофон 16, гальваническая батарея и две электромагнитные катушки 11 и 12), выходной (телефонный наушник 18, трансформатор, гальваническая батарея, анод 9 и катоды 7, 8) и ртутной газоразрядной лампы. Входная и выходная цепи усилителя не имеют прямого соединения. Связующим звеном между двумя этими цепями является ионизированная парами ртути электрическая дуга, которая зажигается между анодом 5 и катодом 6. Для работы усилителя необходимо было в начале лампу наклонить влево, чтобы ртуть замкнула катоды 6 и 4, а потом включить выключателем 26 гальваническую батарею 22. Как только лампа принимала вертикальное положение и ртуть начинала уходить в свои емкости (катоды 6 и 4), то зажигалась дуга между катодами 6 и 4, которая вызывала зажигание дуги между анодом 5 и катодом 6. Усилитель начинал работать. Если теперь начать говорить в микрофон 16, то возникшие электрические сигналы, поданные на электромагнитные катушки 11 и 12, вызывали изменение анодного тока между катодом 6 и анодом 5, что в свою очередь изменяло электрический ток между погруженными в дугу катодами 7, 8 и анодом 9. Та-

ким образом, происходило усиление электрического сигнала. И, как результат — громкий звук в телефонном наушнике 18.

В этом патенте формула изобретения содержит уже 10 пунктов. В первом пункте патента отмечены особенности конструкции реле для получения усиления электрического сигнала: «Электрическое реле, содержащее камеру, средство, включающее пару электродов для поддержания в ней потока ионизированной дуги, выходную цепь, включающую электрод, погруженный в указанный поток между указанной парой электродов, и входную цепь, включающую средство для переменного отклонения указанного потока в области упомянутого электрода».

Заметим, что патенты US1118172A и US1118173A были выданы только через 2 года после подачи заявок на них, 24 ноября 1914 года. На ртутный газоразрядный звуковой усилитель конструкции Г. Арнольда (рис. 4) были получены патенты в Великобритании GB191229384A «Способ воспроизведения электрических вариаций» (англ. *Method of Reproducing Electric Variations*) и Франции FR449842A «Улучшения в электрических реле» (фр. *Perfectionnements dans les relais électriques*).

5. Газоразрядный генератор электрических колебаний

Первую заявку на получение патента «Устройство для генерации электрических колебаний» (нем. *Einrichtung zur Erzeugung elektrischer Schwingungen*) на изобретение генератора на вакуумной электронной лампе подал 10 апреля 1913 года в Германское патентное ведомство сотрудник немецкой компании Telefunken Александр Мейсснер⁵ [20]. Знал ли об этом немецком патенте Гарольд Арнольд, подавая заявку на получение своего патента «Генератор переменного тока» (англ. *Alternating current generator*) 12 июня 1913 года, доподлинно не известно. В тексте патента Арнольда нет ни одного слова о ламповом генераторе Мейсснера.

Арнольд разработал и описал в патенте US1118174A генератор переменного тока на раннее изобретенной им ртутной газоразрядной лампе [21]. Изобретение относится к устройству для генерирования незатухающих высокочастотных электрических колебаний. Когда требуются колебания такого характера, обычно используют свободные колебания, которые могут возникать в цепи, содержащей емкость и индуктивность. В схеме такого типа, содержащей обычный конденсатор и катушку индуктивности, колебания могут генерироваться путем заряда конденсатора, а затем введения некоторого неустойчивого состояния в цепи, такого, напри-

⁵ Патент зарегистрирован на компанию Gesellschaft für drahtlose telegraphie M. B. H. in Berlin. В тексте патента авторство А. Мейсснера не указано.

мер, как разряд через искровой промежуток. Он вызывает колебания с частотой, которая определяется собственной частотой цепи. Амплитуда колебаний постепенно уменьшается по мере рассеивания энергии заряда конденсатора.

В патенте Арнольда отмечается, что генератор может быть использован для многих целей, в частности, в беспроводной телеграфии и телефонии, где необходимо генерировать устойчивые и незатухающие колебания. Целью настоящего изобретения является создание такого генератора. Для этого в дополнение к обычному колебательному контуру, содержащему емкость и индуктивность, используется вспомогательный контур, задачей которого является подача энергии в колебательный контур и, таким образом, предотвращение затухания колебаний.

Для того чтобы энергия могла подаваться в колебательный контур с требуемыми приращениями и через определенные промежутки времени, часть вспомогательного контура состоит из поля ионизированного пара, на который воздействует магнитное поле колебаний в колебательном контуре. Поле ионизированного пара создается дуговым разрядом в вакуумной трубке, которая содержит пары ртути. Этот дуговой разряд поддерживается контуром через газовую среду, которая при этом образуется независимо как от колебательного, так и от вспомогательного контуров, упомянутых выше.

На рис. 5 (Fig. 1) показан общий вид одного из вариантов генератора переменного тока по изобретению. На рис. 5 (Fig. 2 — Fig. 4) представлены модификации конструкции генератора.

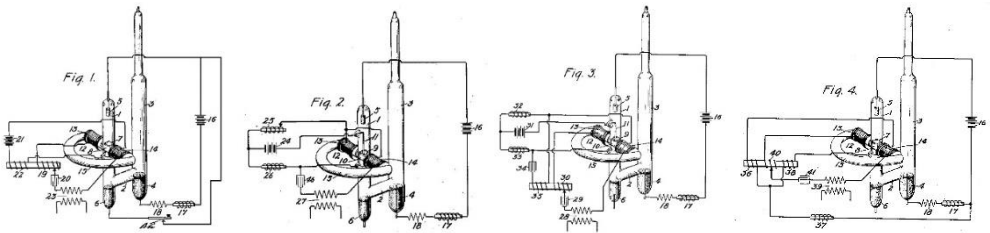


Рис. 5. Генератор переменного тока на ртутной газоразрядной лампе конструкции Гарольда Арнольда. Рисунки из патента US1118174A приоритетом от 12 июня 1913 г.

Fig. 5. An alternating current generator on a mercury gas discharge lamp designed by Harold Arnold. Drawings from US1118174A, priority June 12, 1913

В генераторе, показанном на рис. 5 (Fig. 1), один из электродов, соединенный с отрицательной батареей, действует как катод. Экспериментально установлено, что при отклонении дуги магнитом к катоду происходит увеличение тока во вспомогательной цепи, а отклонение в другую сторону вызывает соответствующее уменьшение тока в такой цепи. Таким

образом, пульсации во вспомогательном контуре вызываются колебаниями в колебательном контуре. Поскольку эти две цепи индуктивно связаны, было обнаружено, что, по существу, в то время, когда пульсация приближается к своему максимальному значению, соответствующее колебание приближается к своему максимальному положительному значению, а когда пульсация приближается к своему минимальному значению, соответствующее колебание приближается к своему максимальному отрицательному значению, так что в любом случае импульс стремится поддерживать колебание и предотвращает его затухание. В формуле изобретения содержится 5 пунктов. Приведем 4-й пункт из него, который показывает генерирование электрических колебаний устройством:

«В генераторе переменного тока для поддержания поля ионизированного пара предусмотрены колебательный контур, взаимодействующий с ним вспомогательный контур, содержащий источник энергии и путь тока через указанный ионизированный пар и средства, включенные в указанный колебательный контур и реагирующие на колебания в нем для изменения проводимости указанного ионизированного пара, вызывая тем самым пульсации энергии во вспомогательном контуре, при этом указанные пульсации усиливают колебания в колебательном контуре».

На рассмотренный генератор переменного тока Гарольд Арнольд 24 ноября 1914 года получил американский патент US1118174A.

6. Газоразрядные телефонные трансляторы

Полученный Арнольдом опыт в разработке одностороннего звукового усилителя на ртутной газоразрядной лампе позволил ему разработать двухсторонний усилитель звуковой частоты для использования в телефонных линиях дальней связи. В конце 1914 г. такой усилитель был готов, рис. 6.

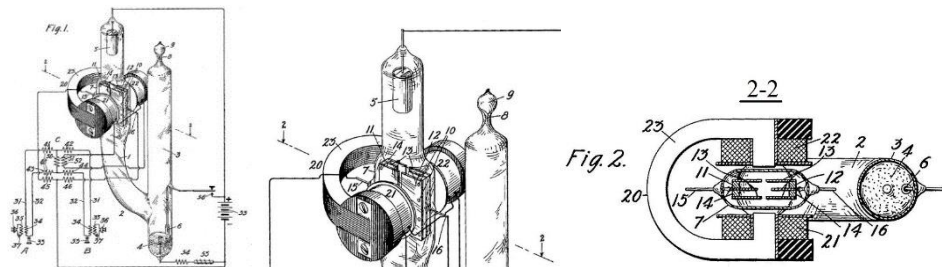


Рис. 6. Устройство звукового усилителя на ртутной газоразрядной лампе.
Рисунки из патента Гарольда Арнольда US1118175A с приоритетом от 8 января 1914 г.

Fig. 6. The device of the sound amplifier on a mercury gas-discharge lamp.
Drawings from Harold Arnold's patent US1118175A with priority dated January 8, 1914

В новом усилителе (рис. 6) принцип работы был тот же, что и в его патенте US1118172, но отличался некоторыми новыми техническими решениями. Была использована другая конструкция ртутной газоразрядной лампы, в которой дуга зажигалась электрическим способом, в связи с этим отпала необходимость для этого наклонять лампу. Арнольд применил в выходной цепи другую конструкцию электродов (11, 12), которые находились в электрической дуге (в виде пластин).

Патентная заявка на этот звуковой усилитель под названием: «Электрическое релейное устройство» (англ. *Electric relay apparatus*, рис. 6) была подана 8 января 1914 г., а в конце года получен сам патент US1118175A [22] вместе с подобным патентом, поданным еще в 1912 году. На этот усилитель Г. Арнольда (рис. 6) были получены патенты в Великобритании GB191409092A «Усовершенствования в электрических релейных аппаратах для телефонии и других переменных токов» (англ. *Improvements in Electric Relay Apparatus for Telephonic and other Variable Current*) и Франции FR19806E «Улучшения в электрических реле» (фр. *Perfectionnements dans les relais électriques*).

Первые полевые эксперименты с ртутно-дуговым ретранслятором были проведены в конце декабря 1912 года в Филадельфии на нагруженных цепях кабеля Нью-Йорк — Вашингтон. В течение следующих двух лет был изготовлен ряд других экспериментальных установок. На рис. 7 приведена экспериментальная работающая установка с двумя телефонными ретрансляторами на ртутной газоразрядной лампе, изготовленными по патенту US1118175A.

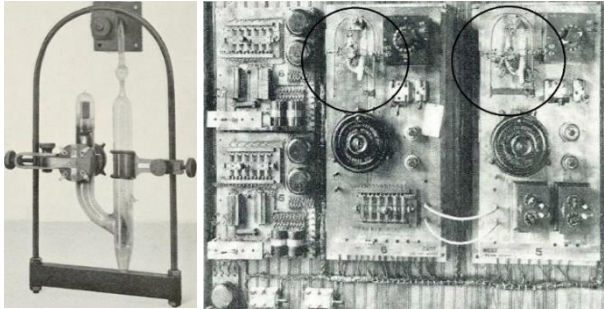


Рис. 7. Общий вид (слева) экспериментального ртутного газоразрядного звукового усилителя конструкции Гарольда Арнольда (1912 г.) и экспериментальная установка (справа) с ртутными газоразрядными ретрансляторами (выделены окружностями) на трансконтинентальной телефонной линии. 1912 г.

Fig. 7. General view (on the left) of an experimental mercury gas-discharge sound amplifier designed by Harold Arnold (1912) and an experimental setup (on the right) with mercury gas-discharge repeaters (highlighted by circles) on a transcontinental telephone line. 1912

Газоразрядная лампа Арнольда прошла экспериментальную проверку кроме линии Нью-Йорк — Вашингтон и на некоторых других телефонных линиях. Она использовалась в течение короткого периода времени только под специальным техническим контролем. Например, эти устройства были установлены на важных междугородних трассах между Нью-Йорком и Сан-Франциско, но никогда не использовались в коммерческих целях [23].

В конце весны 1915 года на трансконтинентальной линии были проведены значимые эксперименты с использованием трех, а иногда и четырех ртутно-дуговых ретрансляторов в тандеме. В некоторых отношениях общие характеристики передачи были хорошими, но в целом они не были столь удовлетворительными, как позже, в случае с вакуумными ламповыми (усовершенствованный аудион Ли де Фореста) ретрансляторами. Значительные трудности возникли при запуске и обслуживании ртутных дуговых усилителей. При этом они имели еще один серьезный недостаток — во время работы издавали сильный шум, похожий на шум дугового датчика с угольными электродами.

Газоразрядная лампа Арнольда примечательна главным образом тем, что явилась предшественницей усилительной вакуумной электронной лампы типа «триод». Это газоразрядное устройство имело неплохое усиление, которое почти не зависело от искажений, за исключением тех, что могли быть вызваны тем фактом, что полное сопротивление электромагнитов не совпадало с полным сопротивлением телефонной линии. Помимо этого, лампе Арнольда, при удовлетворительном усилении, была свойственна трудность настройки.

Интересно, что Арнольд в один день, 24 января 1914 года, вместе с патентом US1118175A получил патент US1118176A на «Репитер с отрицательным сопротивлением» (англ. *Negative-resistance repeater*), заявку на который подал 7 мая 1914 г. [24] Это изобретение относилось к телефонной трансляции электрическими волнами и, в частности, к использованию отрицательного сопротивления для этого, а также для усиления электрической энергии волн. Его цель состояла в том, чтобы обеспечить в упрощенной форме устройства усиленное воспроизведение вариаций энергии тока без искажения формы волны. Рассматриваемое изобретение основано на открытии того факта, что на паре вспомогательных электродов, расположенных на противоположных сторонах ионизированного столба пара, может существовать чрезвычайно высокое отрицательное сопротивление.

На рис. 8 (Fig. 1) показано устройство репитера с отрицательным сопротивлением и его включение в телефонную линию, а на рис. 8 (Fig. 2) показан его модифицированный вариант.

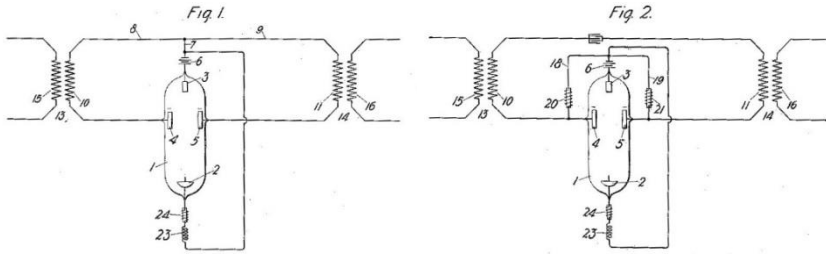


Рис. 8. Репитер с отрицательным сопротивлением. Рисунки из патента Гарольда Арнольда US1118176A с приоритетом от 7 мая 1914 г.

Fig. 8. Negative resistance repeater. Drawings from Harold Arnold's patent US1118176A with priority dated May 7, 1914

Из рис. 8 видно, что в вакуумном сосуде 1 для получения ионизированного столба пара используется ртутно-дуговое устройство, которое содержит ртутный катод 2 и анод 3. Анод 3 изготавливается из любого подходящего материала. Для зажигания дуги между анодом и катодом может быть использовано любое подходящее средство, которое не показано на рисунке. Внутри сосуда 1 закреплена пара вспомогательных электродов 4, 5, расположенных на противоположных сторонах столба пара и расположенных точно друг напротив друга. При таком устройстве пары ионизированной ртути поддерживаются между указанными вспомогательными электродами.

На рис. 8 (Fig. 1) и 8 (Fig. 2) показана двусторонняя система передачи, две половины которой подобны. Следовательно, любую половину можно рассматривать как входную цепь, а другую половину — как выходную цепь. В устройстве предусмотрены подходящие средства для подачи отрицательного потенциала на оба электрода 4 и 5. В показанной схеме такие средства включают батарею 6 или другой подходящий источник постоянного тока. Отрицательный полюс указанной батареи 6 соединен с каждым из вспомогательных электродов 4 и 5, а ее положительный полюс может быть соединен с одним из электродов 2 и 3, причем на чертежах он показан соединенным с анодом 3. Для удобства иллюстрации батарея 6 показана как та же батарея, которая используется для подачи тока, создающего поток паров ртути между катодом 2 и анодом 3.

Отрицательный потенциал вспомогательных электродов 4 и 5 намного выше отрицательного потенциала катода 2. Автор изобретения отмечает, что отрицательный потенциал вспомогательных электродов должен быть на 40 В или более выше отрицательного потенциала катода. Благодаря высокому отрицательному сопротивлению на электродах 4 и 5 поток тока, создаваемый колебаниями тока во входной цепи, значительно усиливается, и такое усиление повторяется в выходной цепи.

Схема создания дуги в парах ртути между анодом и катодом включает обычное сопротивление 23 и высокое сопротивление 24.

Основной поток дуги между катодом 2 и анодом 3, как было показано, можно использовать в качестве повторителя с отрицательным сопротивлением. В этом случае, как было отмечено в патенте, отрицательное сопротивление составляет примерно 2 Ом по сравнению с отрицательным сопротивлением около 400000 Ом между вспомогательными электродами. Это огромное различие указывает на то, что настоящее изобретение основано на принципе, отличном от использовавшегося до сих пор. Формула изобретения содержит 7 пунктов.

Патент на репитер с отрицательным сопротивлением не был воплощен Арнольдом в практическую конструкцию и явился последним запатентованным устройством для использования в телефонной трансляции. Больше он не занимался применением газоразрядных технологий для усиления электрических сигналов в телефонных линиях, а переключился для той же цели на разработку электронных ламп типа аудиона Ли де Фореста.

7. Использование газоразрядной лампы Арнольда в усилителях

В преддверии Первой мировой войны, за 1 год до ее начала (1 августа 1914 г.), возрос объем информации, передаваемый по атлантическим кабелям. В AT&T отдел Эдвина Колпиттса (*Edwin H. Colpitts*) получил заказ на изготовление устройства для эффективного усиления слабых низкочастотных электрических сигналов атлантических кабелей. Из-за высоких капитальных затрат на прокладку океанских кабелей компаниям-операторам необходимо было максимизировать пропускную способность сообщений, чтобы получить наибольшую отдачу от своих инвестиций.

Известно, что закон электрических цепей требует, чтобы импеданс внешнего тракта в цепи был равен импедансу внутреннего тракта или источника всякий раз, когда требуется передача максимума энергии. В океанской кабельной телеграфии в тот период времени, обычно, для фиксации полученной информации подключали самописец (англ. *siphon recorder*, рис. 9) непосредственно к наземным клеммам кабельной цепи. Для того, чтобы принимать на самописец максимальную доступную информацию, его приемный магнит должен быть намотан так, чтобы обеспечить сопротивление того же порядка, что и сопротивление кабельной цепи, измеренное на ее входных выводах. Например, если сопротивление кабельной цепи, измеренное на ее входных клеммах к токам телеграфной частоты составляет, скажем, 2000 Ом, то наилучшее сопротивление для магнита регистратора в этом случае также будет составлять 2000 Ом. Когда такое выравнивание им-

педансов обеспечено, можно сказать, что схема сбалансирована. Если же импедансы источника и приемного устройства сильно несоразмерны, то возникает несбалансированное состояние и потеря доступной информации.

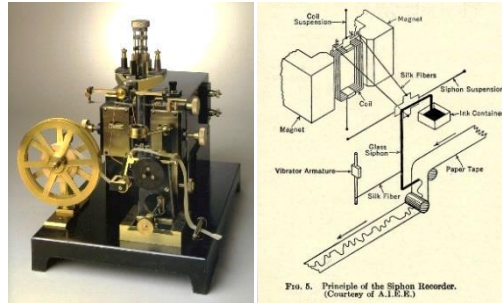


Рис. 9. Сифонный регистратор Мюрхеда. Принцип работы сифонного регистратора [25].

Fig. 9. Muirhead siphon recorder. Principles of the siphon recorder [25]

Колпиттс начал разрабатывать усилительное устройство в первой половине 1914 года, когда уже компания купила патенты на аудион у Ли де Фореста и Арнольд проводил работы с газоразрядными репитерами и параллельно экспериментировал с аудионами. Все это отразилось на схемном решении усилителя Колпиттса, в котором он использовал ртутную газоразрядную лампу (рис. 10, Fig. 1) и аудионы де Фореста [26]. На рис. 10 (Fig. 1) океанский кабель представлен проводниками 1 и 2, которые подсоединяются ко входу усилителя ионизированного газа 3 непосредственно в цепи с его электромагнитом 4. На выходе усилителя установлено регистрирующее устройство 5, которое может быть сифонным регистратором или другим устройством, например, для воспроизведения или записи электрических волн, принимаемых через кабель.

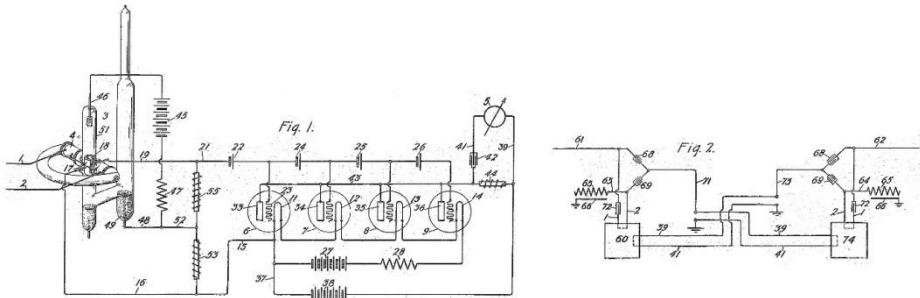


Рис. 10. Система усиления электрических колебаний атлантического телеграфного кабеля.

Рисунки из патента Эдвина Колпиттса US1129959 с приоритетом от 6 апреля 1914 г.

Fig. 10. Amplification system of electric oscillations of the Atlantic telegraph cable.

Drawings from Edwin Colpitts patent US1129959 with priority April 6, 1914

Такое необычное сочетание разных типов ламповых компонентов было продиктовано следующими соображениями. Из различных типов известных усилительных устройств, которые относятся к общему классу репитеров вакуумного разряда, такие как ионизированный газовый тип и тип, известный как термоэмиссионный, примером которого является «аудион», имеют преимущества в отношении усиления токов очень низкой частоты, поскольку выходные токи в таких устройствах не подвержены сильным искажениям из-за внешних или внутренних возмущений, а в значительной степени их формы определяются формой входного тока.

Ретрансляторы, кроме того, на ионизированном газе тех видов, которые используют электромагниты для приема входящих токов, обычно имеют свои магниты, намотанные приблизительно с импедансом кабельных цепей. При этом возможна эффективная работа при прямом подключении ко входным клеммам таких цепей. Что касается аудионов, то следует отметить, что импеданс их выходных цепей, хотя и значительно выше, чем у обычных сифонных записывающих устройств, используемых в океанской кабельной телеграфии, обычно не так высок, как у их входных цепей, и может быть с помощью соответствующих решений уменьшен, благодаря чему происходит адаптация аудиона для прямого подключения к регистраторам. Одним из способов снижения выходного импеданса является использование нескольких аудионов с параллельным подключением их выходных цепей. Таким образом, импеданс может быть уменьшен до определенной степени для формирования достаточно сбалансированных соединений с записывающими устройствами.

Ретранслятор с ионизированным газом имеет выходную цепь с импедансом порядка нескольких сотен тысяч Ом, в то время как аудион имеет входную цепь с таким же высоким импедансом. Такие импедансы настолько непропорциональны импедансу кабельной цепи или любой практической обмотки сифонного самописца, что прямое соединение между выходными клеммами газового повторителя и сифонным самописцем или соединение между входными клеммами аудиона или даже нескольких аудионов и кабельной цепью приведут к неэффективной работе. Кроме того, из-за очень низкой частоты слабых электрических колебаний в кабельной телеграфии, а в некоторых случаях, например, в океанской телеграфии, частота этих волн составляет всего два периода в секунду.

На рис. 10 (Fig. 2) б показана схема соединения усилителей 60 и 74, если требуется двухсторонняя передача или дуплексная работа. В этом случае для каждого проводника предусмотрены искусственные линии 63 и 64. Каждая такая искусственная линия может содержать сопротивление 65 и распределенную емкость между этим сопротивлением и заземляющей

пластиной 66. Этим устройством сообщения могут передаваться в обоих направлениях одновременно в сквозном контуре кабельных проводников 61 и 62, при этом токи усиливаются в точке, где секции объединены.

Предложенная Колпиттсом схема цепи «выход — вход» между двумя каскадами с высокими импедансом: первый каскад на ионизированной газовой лампе, а второй — на термоэмиссионной лампе, позволяет получить электрически сбалансированную систему, которая в целом хорошо приспособлена для эффективного усиления [27]. Добавим, что при этом решена особая задача, поставленная в изобретении — создание эффективной системы усиления, адаптированной без трансформаторов для использования на приемном конце сигнальной цепи.

8. Заключение

Создание в *Western Electric Company* исследовательской группы по разработке устройства телефонной трансляции на новых физических принципах и приглашение в эту группу молодых талантливых ученых дало свои плоды. Лидером в решении поставленных задач стал Гарольд Арнольд, которого Милликен характеризовал как «одного из самых умных людей, исследования с которыми он когда-либо проводил в лабораториях».

Арнольду удалось разработать ртутную газоразрядную лампу, на основе которой он построил усилитель звуковой частоты для телефонных линий, генератор электрических колебаний и устройство для телефонной трансляции. Помимо этого, он представил идею о репитере с отрицательным сопротивлением в виде патента. Всего им было получено 5 американских патентов, в которых фигурирует газоразрядная лампа. Из 5 патентов только один патент US1118175A на телефонную трансляцию (репитер) получил практическое применение в виде экспериментального устройства на действующей телефонной линии. Патент Арнольда US1118173A на первую конструкцию усилительной ртутной газоразрядной лампы был использован Колпиттсом при разработке системы усиления электрических колебаний атлантических кабелей. Это была одна из нескольких несовершенных технологий, которые телефонные компании пытались применить для усиления телефонных сигналов до открытия практического использования вакуумной лампы типа аудион (вакуумный триод) в качестве усилителя в 1912 году.

Дальнейшие исследования Г. Арнольда с усилителями электрических сигналов на ртутных газоразрядных лампах показали, что они не способны конкурировать с усилителями на усовершенствованных аудионах ввиду трудоемкости изготовления конструкции, содержащей большее количество

ртути, а также сложности их обслуживания. На самом деле разработка ртутно-дугового устройства начала замедляться в конце 1912 года, вскоре после того, как компания купила патенты на аудион и начались работы над его улучшением. Из-за этого Г. Арнольд прекратил дальнейшие разработки усилителей на ртутных лампах и в последующем занимался конструированием только электронных устройств на жестких лампах типа вакуумного триода, доведя их до практического внедрения на линиях связи.

Успех, который был быстро достигнут позже в разработке удовлетворительного лампового ретранслятора высокого вакуума, оставляет без ответа вопрос о том, можно ли было разработать ртутный дуговой ретранслятор, чтобы он стал полностью удовлетворительным усилителем речевой частоты. Его более сложная структура, потребность в более сложных и более дорогих вспомогательных устройствах для подключения к работающим телефонным цепям и большие трудности в эксплуатации и обслуживании были серьезными препятствиями. Кроме того, этот ретранслятор имел большие ограничения не только в коэффициенте усиления, но и ограничения в рабочей полосе частот. Разработанное устройство могло использоваться только в качестве усилителя речевой частоты.

Невзирая на это, работы Г. Арнольда по усилительным ртутным газоразрядным лампам и сегодня, в XXI веке, вызывают научный интерес и восхищение перед его научной мыслью.

Список литературы

1. Пестриков В. М. Выбор тренда развития Bell System в начале XX века // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 3. С. 395—427.
2. Пестриков В. М. Роберт Милликен и его роль в рождении современных радиоламп // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 4. С. 587—610.
3. Пестриков В. М. Конкуренты аудиона на рынке радиотехнологий // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2021. Т. 4, № 4. С. 322—352.
4. Shaw T. The conquest of distance by wire telephony // The Bell System Technical Journal. October, 1944. Vol. XXIII, no. 4. P. 337—421.
5. Пестриков В. М. Применение катодно-лучевых технологий для усиления электрических сигналов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 3. С. 360—383.
6. Baker R. S. Peter Cooper Hewitt – inventor // McClure's magazine. June, 1903. Vol. 21, no. 2. P. 172—178.
7. Three remarkable discoveries // The World's Work. February, 1902. Vol. 3, no. 4. P. 1791.
8. Hewitt P. C. Electric lamps. Patent US682690. Patented September 17, 1901. Application filed April 5, 1900.
9. Откуда пошли лампы дневного света. Сайт «Инженерия зданий и сооружений». URL: <http://engineering-ru.livejournal.com/4657.html> (дата обращения: 01.11.2022).
10. Hewitt P. C. Means for reproducing electrical variations. Patent US749791. Patented Jan. 19, 1904. Application filed May 16, 1902.

11. Hewitt P. C. Vapor electric device. Patent US1052057. Patented February 4, 1913. Application filed, July 24, 1905.
12. Hewitt P. C. Vapor electric apparatus. Patent US1025464. Patented May 7, 1912. Application filed, March 23, 1908.
13. Taylor J. B. Mercury arc relay. Patent US953361. Patented March 29, 1910. Application filed September 17, 1907.
14. Hoddeson L. The Emergence of Basic Research in the Bell Telephone System, 1875–1915 // *Technology and Culture*. July 1981. Vol. 22, no. 3. P. 512—544.
15. Records & Briefs. 15. Transcript of Record. Supreme Court of the United States. October Term, 1930. Vol. I, no. 630. De Forest Radio Company, Petitioner, General Electric Company. On Writ of Certiorari to the United States circuit court of appeals for the third circuit. P. 571.
16. Hewitt P. C. Means for reproducing electrical variations. Patent US991304A. Patented May 2, 1911. Application filed July 7, 1904.
17. Hewitt P. C. Method of manufacturing vapor or gas lamps. Patent US682699A. Patented September 17, 1901. Application filed April 5, 1900. Renewed May 2, 1901. P. 1, line 36.
18. De Forest A. H. Method of producing electrical variations. Patent US1118172A. Patented November 24, 1914. Application filed July 15, 1912.
19. De Forest A. H. Electric relay. Patent US1118173A. Patented Nov. 24, 1914. Application filed July 15, 1912.
20. Gesellschaft für drahtlose Telegraphie M. B. H. in Berlin. Patent DE291604. Einrichtung zur Erzeugung elektrischer Schwingungen. Patentiert im Deutschen Reich vom 10. April 1913.
21. De Forest A. H. Alternating current generator. Patent US1118174A. Patented November 24, 1914. Application filed June 12, 1913.
22. De Forest A. H. Electric relay apparatus. Patent US1118175A. Patented Nov. 24, 1914. Application filed January 8, 1914.
23. Bancroft G., Jowett F. B. Telephone repeaters // *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. July to December, 1919. Vol. 38, part 2. P. 1320.
24. De Forest A. H. Negative-resistance repeater. Patent US1118176A. Patented Nov. 24, 1914. Application filed May 7, 1914.
25. Burns B. Early Cable Instruments.
URL: <https://atlantic-cable.com/Article/Instruments/index.htm> (дата обращения: 04.12.2022).
26. Colpitts E. H. System for amplifying electric waves. Patent US1129959. Patented March 2, 1915. Application filed April 6, 1914.

Информация об авторе

Пестриков Виктор Михайлович, д. т. н., профессор Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Mercury Discharge Lamps by Harold Arnold and Their Application

V. M. Pestrikov

St. Petersburg State University of Film and Television
13, Pravda st. St. Petersburg, 191119, Russian Federation
pvm205@yandex.ru

Received: July 27, 2022

Peer-reviewed: July 30, 2022

Accepted: July 30, 2022

Abstract: *The article details the creation of the first telephone relay devices at WECO for the future extra-long telephone line New York – San Francisco. The main attention in the article is focused on the development of these devices by an employee of the company Harold Arnold based on mercury gas discharge technologies. An analysis of the designs of repeaters that existed before 1911 is given. The substantiation of the chosen scientific direction for the development of repeaters in WECO is given. The designs of Peter Cooper Hewitt mercury discharge lamps and John Bellamy Taylor’s mercury arc relay are considered. It was noted that the organization of a research group at WECO to develop repeaters based on new physical principles and the invitation of young talented scientists to this group made it possible to obtain a significant scientific result.*

Keywords: *New York – San Francisco telephone line, telephone relay, repeater, mercury discharge lamps, Peter Cooper Hewitt, Harold Arnold mercury discharge lamps.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov, “Mercury discharge lamps by Harold Arnold and their application,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 81–107, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.08. (In Russ.).

References

- [1] V. M. Pestrikov, “Choice of Development Trend of Bell System at the Beginning of the 20th Century,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 395–427, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.3.30. (In Russ.).
- [2] V. M. Pestrikov, “Robert Millikan and His Role in the Birth of Modern Radio Tubes,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 4, pp. 587–610, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.4.41. (In Russ.).
- [3] V. M. Pestrikov, “Audion Competitors in the Radio Technology Market,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 4, pp. 322–352, 2021. (In Russ.).
- [4] Shaw Thomas, “The conquest of distance by wire telephony,” *The Bell System Technical Journal*, October, 1944, vol. XXIII, no. 4, pp. 337–421.
- [5] V. M. Pestrikov “Application of cathode-ray technologies for amplification of electrical signals,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 3, pp. 360–383, 2020. (In Russ.).

- [6] “Baker Rray Stannard. Peter Cooper Hewitt – inventor,” *McClure’s magazine*, June, 1903, vol. 21, no. 2, pp. 172–178.
- [7] “Three remarkable discoveries,” *The World’s Work*, February 1902, vol. 3, no. 4, p. 1791.
- [8] P. C. Hewitt, “Electric lamps,” Patent US682690. Patented September 17, 1901. Application filed April 5, 1900.
- [9] Where did fluorescent lamps come from. Site “Engineering of buildings and structures”. URL: <http://engineering-ru.livejournal.com/4657.html> (01.11.2022). (In Russ.).
- [10] P. C. Hewitt, “Means for reproducing electrical variations,” Patent US749791. Patented Jan. 19, 1904. Application filed May 16, 1902.
- [11] P. C. Hewitt, “Vapor electric device,” Patent US1052057. Patented February 4, 1913. Application filed, July 24, 1905.
- [12] P. C. Hewitt, “Vapor electric apparatus,” Patent US1025464. Patented May 7, 1912. Application filed, March 23, 1908.
- [13] John B. Taylor, “Mercury arc relay,” Patent US953361. Patented March 29, 1910. Application filed September 17, 1907.
- [14] Lillian Hoddeson, “The Emergence of Basic Research in the Bell Telephone System, 1875–1915,” *Technology and Culture*, July 1981, vol. 22, no. 3, p. 532.
- [15] “Records & Briefs. 15. Transcript of Record. Supreme Court of the United States,” October Term, 1930, vol. I, no. 630, *De Forest Radio Company, Petitioner, General Electric Company. On Writ of Certiorari to the United States circuit court of appeals for the third circuit*, p. 571.
- [16] P. C. Hewitt, “Means for reproducing electrical variations,” Patent US991304A. Patented May 2, 1911. Application filed July 7, 1904.
- [17] P. C. Hewitt, “Method of manufacturing vapor or gas lamps,” Patent US682699A. Patented September 17, 1901. Application filed April 5, 1900. Renewed May 2, 1901. P. 1, line 36.
- [18] Arnold Harold De Forest, “Method of producing electrical variations,” Patent US1118172A. Patented November 24, 1914. Application filed July 15, 1912.
- [19] Arnold Harold De Forest, “Electric relay. Patent US1118173A,” Patented Nov. 24, 1914. Application filed July 15, 1912.
- [20] “Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie M. B. H. in Berlin,” Patent DE291604. Einrichtung zur Erzeugung elektrischer Schwingungen. Patentiert im Deutschen Reich vom 10. April 1913.
- [21] Arnold Harold De Forest, “Alternating current generator,” Patent US1118174A. Patented November 24, 1914. Application filed June 12, 1913.
- [22] Arnold Harold De Forest, “Electric relay apparatus,” Patent US1118175A. Patented Nov. 24, 1914. Application filed January 8, 1914.
- [23] Gherardi Bancroft and Jowett Frank B., “Telephone repeaters,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, July to December, 1919, vol. 38, part 2, p. 1320.
- [24] Arnold Harold De Forest, “Negative-resistance repeater,” Patent US1118176A. Patented Nov. 24, 1914. Application filed May 7, 1914.
- [25] Bill Burns. Early Cable Instruments. URL: <https://atlantic-cable.com/Article/Instruments/index.htm>.
- [26] Edwin H. Colpitts, “System for amplifying electric waves,” Patent US1129959. Patented March 2, 1915. Application filed April 6, 1914.

Information about the author

Viktor M. Pestrikov, Dr. Tech. Sc., Professor, St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Infocommunications and Radio Technologies, vol. 6, no. 1, pp. 108–114, 2023.

Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 1. С. 108—114.

ISSN: 2587-9936

DOI: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.09

УДК 621.396(091)

Проект IEEE oral history: академик Ю. В. Гуляев. Часть 3

Кондратова Е. В., Коломийченко В. П.

*Черноморское высшее военно-морское училище имени П. С. Нахимова
ул. Дыбенко, д. 1а, Севастополь, Российская Федерация, 299028
elenakondratovaa@mail.ru, v.p.kolomiychenko@mail.ru*

Получено: 4 марта 2023 г.

Отрецензировано: 24 марта 2023 г.

Принято к публикации: 24 марта 2023 г.

Аннотация: *Статья представляет собой фрагменты интервью, взятого у академика Ю. В. Гуляева Центром истории IEEE в Горжье, Швейцария, 13 июля 2017 г. Из 14 разделов интервью в статье представлены следующие два: Другие типы акустических волн и Изготовление устройств на ПАВ в Советском Союзе. В статье устранены библиографические несоответствия. Цель публикации — ознакомление в этой части профильного русскоязычного сообщества с основными положениями интервью.*

Ключевые слова: *Центр истории IEEE в Горжье, типы акустических волн, изготовление устройств на ПАВ.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Кондратова Е. В., Коломийченко В. П. Проект IEEE oral history : академик Ю. В. Гуляев. Часть 3 // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 1. С. 108—114.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Кондратова, Е. В. Проект IEEE oral history : академик Ю. В. Гуляев. Часть 3 / Е. В. Кондратова, В. П. Коломийченко // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2023. — Т. 6, № 1. — С. 108—114.

1. Введение

Концепт устной истории был популяризирован в США в 1940-е годы в связи с деятельностью американского журналиста Джо Гулда (Joseph Ferdinand Gould; 1889—1957), заявлявшего о своей работе над огромной книгой «Устная история нашего времени», полностью составленной из записи рассказов разных людей. В 1948 году центр устной истории был открыт при Колумбийском университете. В 1967 году была создана Ассо-

циация устной истории США, двумя годами позже аналогичная организация появилась в Великобритании.

Не остался в стороне от этого тренда и IEEE — к настоящему времени американским Институтом инженеров электротехники и электроники собрано более 804 персональных устных истории. Подавляющее большинство персоналий в этом собрании — известные американские и «западные» специалисты. И, тем не менее, весьма значимым является то, что в этом списке появился известный российский ученый, академик Ю. В. Гуляев.

Интервью у российского академика для Центра истории IEEE взяли Виктор Плесски (Victor Plessky) и Клеменс Руппель (Clemens Ruppel) в Горжье, Швейцария (Gorgier, Switzerland) 13 июля 2017 г. (интервью № 784).¹

Это событие нашло некоторое отражение только в небольшом интервью на портале «Правда.Ру».²

Интервью состоит из 14 разделов:

- [Детство, семья];
- Образование;
- Диссертация под руководством проф. В. Л. Бонч-Бруевича;
- Советский Союз после Сталина;
- Изобретение встречно-штыревого преобразователя в 1965 г.;
- Заведующий лабораторией во Фрязино;
- Волны Блюстейна — Гуляева;
- Другие типы акустических волн;
- Изготовление устройств на ПАВ в Советском Союзе;
- Будущие разработки в области акустических волновых технологий;
- Друзья и награды;
- Саратовский институт;
- Углеродные нанотрубки;
- Исследования в области медицины.

Ранее [1], [2] были опубликованы фрагменты интервью, в которых были отражены такие разделы, как «Изобретение встречно-штыревого преобразователя в 1965 г.» и «Волны Блюстейна — Гуляева», «Диссертация под руководством проф. В. Л. Бонч-Бруевича» и «Советский Союз после Сталина». В настоящей статье представлены еще два раздела швейцарского интервью: «Другие типы акустических волн» и «Изготовление устройств на ПАВ в Советском Союзе». Цель настоящей статьи — ознакомление в этой части профильного русскоязычного сообщества с основными положениями интервью.

¹ http://ethw.org/Oral-History:Yury_Gulyaev (дата обращения 13.07.2018).

² <https://www.prawda.ru/science/02-08-2017/1343721-gulyaev-0/> (дата обращения 13.07.2018).

2. Другие типы акустических волн

Ruppel:

А как насчет волн Марфельда — Турнуа?

Гуляев:

Здесь я должен сказать, что примерно в то же время *BGW* (волны Гуляева — Блюстейна) наблюдались и в *CdS* учеными из параллельной моей группы лаборатории в нашем институте³ А. И. Морозовым и М. И. Земляничным [3]. Но они даже не сообщили мне о своих экспериментах, поэтому я считаю К. Маерфельда, Ф. Гиреса и П. Турнуа пионерами в экспериментальном наблюдении нового явления в акустике — существования сдвиговых поверхностных акустических волн в пьезоэлектрических материалах. К. Маерфельд и П. Турнуа сами предсказали существование другой новой поперечной поверхностной акустической волны, которая при определенных условиях может распространяться вдоль границы раздела двух различных сред, в некотором смысле аналог волн Стоунли, которые называются волнами Маерфельда — Турнуа [4]. В нашей книге [5] описаны различные типы поверхностных акустических волн в неоднородных средах. Другие типы сдвиговых поверхностных акустических волн в твердых телах описаны в моей обзорной статье [6].

Теперь я хочу заметить, что существует и специально исследуется широкий класс так называемых «квази-*BGW*», «почти сдвиговых волн», поверхностный характер которых обеспечивается пьезоэффектом. Дело в том, что, как я уже говорил, волна *BG* является точным решением системы уравнений распространения акустических волн только для определенных симметрий кристаллов и для определенных срезов и направлений распространения. Если вы измените некоторые из этих условий, скажем, немного измените срез кристалла, волна *BG* больше не будет точным решением, она станет немного «дырявой», и помимо сдвигового механического смещения, будут некоторые другие смещения, поэтому будет «квази сдвиговая волна».

Но в некоторых случаях пьезоэлектрические свойства этих «квази-*BGW*» улучшаются, скорость также изменяется необходимым образом, поэтому, несмотря на некоторую «утечку», эти волны могут быть лучше для применения в устройствах с ПАВ. Это происходит для некоторых срезов $LiNbO_3$, $LiTaO_3$, где «дырявые» ПАВ, используемые в фильтрах на ПАВ, по своей структуре в основном представляют собой ПАВ с сильным пьезоэлектрическим коэффициентом и довольно близки к *BGW* [7], [8].

³ Институт радиотехники и электроники РАН, Москва

3. Изготовление устройств на ПАВ в Советском Союзе

Plinsky:

Давайте поговорим о развитии производства устройств на ПАВ в Советском Союзе!

Гуляев:

В 1970—1990-х гг. в Европе, США, СССР, Японии, Германии и в других странах были проведены широкие исследования физических явлений, связанных с взаимодействием ПАВ с электрическими полями и электронами в пьезоэлектрических диэлектриках и полупроводниках, а также в слоистых структурах пьезоэлектрик — полупроводник. Это привело к интенсивному развитию акустоэлектрических устройств для различных радиоэлектронных систем обработки информации и для телекоммуникаций.

В начале 70-х годов началось широкое производство устройств на ПАВ: полосовых и дисперсионных фильтров, линий задержки (в том числе дисперсионных), резонаторов и генераторов, устройств кодирования — декодирования, устройств БПФ, цифровых фильтров Найквиста, синтезаторов частот, устройств свертки и корреляции, датчиков и т. д. В этом производстве приняли участие многие фирмы, такие как Murata, Kyoto Ceramics, Fujitsu, Hitachi, NEC, Samsung, SAWTEK, Thompson CSF, Vectron, Motorola, Siemens, EPCOS и др.

Мы в Советском Союзе организовали производство фильтров на ПАВ для телевизионных производств в Черкассах (Украина) и Минске (Белоруссия), оба сейчас находятся за пределами Российской Федерации. Сегодня в России приборы на ПАВ выпускают такие фирмы как «Морион», «Бутис-М», «Фонон», ОНИИП и некоторые другие небольшие фирмы.

В конце 70-х гг. у меня с коллегами помимо авторских свидетельств и патентов СССР было 15 иностранных патентов США, Великобритании, Франции, Японии и Германии на фильтры ПАВ с емкостными электродами. В связи с существовавшими в то время в СССР правилами все патенты принадлежали государству, поскольку они были получены в ходе работы за государственный бюджет.

Итак, СССР был владельцем патентов и имел права на их продажу. Например, государство (Министерство торговли) продало наш патент японской фирме Murata. Мы получили единовременное вознаграждение за трех авторов. Другой патент был использован в Samsung, и три члена моей команды отправились на 6 месяцев в Сеул, чтобы помочь в организации там производства телевизионных фильтров. К сожалению, сегодня в России нет производства национальных телевизоров, автомобильных радиоприемников, сотовых телефонов и т. д. Таким образом, в России нет необ-

ходимости в широкомасштабном производстве фильтров ПАВ и других акустоэлектронных устройств, что очень печально!

4. Заключение

Интервью, взятое у академика Ю. В. Гуляева Центром истории IEEE — свидетельство мирового признания его научных достижений. Не рассмотренные в настоящем докладе фрагменты интервью представляют интерес для дальнейшего ознакомления профильного русскоязычного сообщества с основными его положениями.

Список литературы

1. Ермолов П. П. Проект IEEE oral history : академик Ю. В. Гуляев. Часть 1. В кн. : 28-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2018 (Севастополь, 9—15 сент. 2018 г.). 2018. С. 1827—1834.
2. Ермолов П. П., Коломийченко В. П., Свиридова Е. И. Проект IEEE oral history: академик Ю. В. Гуляев. Часть 2 // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 257—263.
3. Морозов А. И., Земляничин М. А. Акустоэлектронное взаимодействие в CdS на чисто сдвиговых поверхностных волнах // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 12, № 8. С. 396—399.
4. Maerfeld C., Gires F., Tournois P. Bleustein–Gulyaev surface wave amplification in CdS // Applied Physics Letters. 1971. Vol. 18, no. 7. P. 269—272.
5. Surface Acoustic Waves in Inhomogeneous Media / S. V. Biryukov, Y. V. Gulyaev, V. V. Krylov, V. P. Plessky. Berlin : Springer Science & Business Media, 1995. 388 p.
6. Gulyaev Y. V. Review of shear surface acoustic waves in solids // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 1998. Vol. 45, no. 4. P. 935—938.
7. Hashimoto K.-Y. Surface acoustic wave devices in telecommunications : modelling and simulation. Berlin ; New York : Springer, 2000. 330 p.
8. Morgan D. P. Surface acoustic wave filters. Amsterdam ; London : Academic Press, 2007. 429 p.

Информация об авторах

Кондратова Елена Васильевна, доцент кафедры физики и общетехнических дисциплин Черноморского высшего военно-морского училища имени П. С. Нахимова, Севастополь, Российская Федерация.

Коломийченко Виктория Павловна, старший преподаватель кафедры физики и общетехнических дисциплин Черноморского высшего военно-морского училища имени П. С. Нахимова, Севастополь, Российская Федерация.

IEEE Oral History Project: Academician Yu. V. Gulyaev. Part 3

Ye. V. Kondratova and V. P. Kolomiychenko

*Black Sea Higher Naval School n. a. P. S. Nakhimov
1a, Dybenko Str., Sevastopol, Russian Federation, 299028*

Received: March 4, 2023

Peer-reviewed: March 24, 2023

Accepted: March 24, 2023

Abstract: *The article is a fragment of an interview taken by Academician Yu. V. Gulyaev by the IEEE History Center in Gorgier, Switzerland, July 13, 2017. Of the 14 interview sections, the article presents the following two: Other types of acoustic waves and SAW devices fabrication in Soviet Union. The article eliminated bibliographic inconsistencies. The purpose of the report is to familiarize in this part of the profile Russian-speaking community with the main provisions of the interview.*

Keywords: *Center for IEEE History in Gorgier, types of acoustic waves, SAW devices fabrication, Soviet Union.*

For citation (IEEE): Ye. V. Kondratova and V. P. Kolomiychenko, “IEEE Oral History Project : Academician Yu. V. Gulyaev. Part 3,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 108–114, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.09. (In Russ.).

References

- [1] P. P. Yermolov, “IEEE oral history project : Academician Yu. V. Gulyaev. Part 1,” in *28th International Conference “Microwave & Telecommunication Technology”*, Sevastopol, 2018, pp. 1827–1834. (In Russ.).
- [2] P. P. Yermolov, V. P. Kolomiychenko, and Ye. I. Sviridova, “IEEE oral history project : Academician Yu. V. Gulyaev. Part 2,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 257–263, 2019.
- [3] A. I. Morozov and M. A. Zemlyanitsyn, “Acousto-electronic Interaction in CdS for Pure Shear Surface Waves,” *JETP Letters*, vol. 12, iss. 8, pp. 396–399, 1970.
- [4] C. Maerfeld, F. Gires, and P. Tournois, “Bleustein–Gulyaev surface wave amplification in CdS,” *Applied Physics Letters*, vol. 18, no. 7, pp. 269–272, Apr. 1971, doi: <https://doi.org/10.1063/1.1653658>.
- [5] S. V. Biryukov, Y. V. Gulyaev, V. V. Krylov, and V. P. Plessky, *Surface Acoustic Waves in Inhomogeneous Media*. Springer Science & Business Media, 1995.
- [6] Y. V. Gulyaev, “Review of shear surface acoustic waves in solids,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 45, no. 4, pp. 935–938, Jul. 1998, doi: <https://doi.org/10.1109/58.710563>.
- [7] Ken-Ya Hashimoto, *Surface acoustic wave devices in telecommunications : modelling and simulation*. Berlin ; New York : Springer, 2000.
- [8] D. P. Morgan, *Surface acoustic wave filters*. Amsterdam ; London : Academic Press, 2007.

Information about the authors

Yelena V. Kondratova, Associate Professor at the Department of Physics and General Engineering, Black Sea Higher Naval School n. a. P. S. Nakhimov, Sevastopol, Russian Federation.

Viktoriya P. Kolomiychenko, Senior Lecturer, Department of Physics and General Engineering, Black Sea Higher Naval School n. a. P. S. Nakhimov, Sevastopol, Russian Federation.

Infocommunications and Radio Technologies, vol. 6, no. 1, pp. 115–126, 2023.

Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2023. Т. 6, № 1. С. 115—126.

ISSN: 2587-9936

DOI: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.10

УДК 621.396(091)

Один из ведущих отечественных «автодинщиков» (к 75-летию профессора В. Я. Носкова)

Ермолов П. П.

Севастопольский государственный университет

ул. Университетская, д. 33, Севастополь, Российская Федерация, 299053

yermolov@icrtjournal.com

Получено: 17 марта 2023 г.

Отрецензировано: 24 марта 2023 г.

Принято к публикации: 24 марта 2023 г.

Аннотация: Дано краткое описание жизни и деятельности Владислава Яковлевича Носкова, одного из ведущих отечественных «автодинщиков», профессора Уральского федерального университета им. Первого Президента России Б. Н. Ельцина. В статье представлены разделы: Школьные годы; Томский институт радиоэлектроники и электронной техники; Нижнетагильский период; Екатеринбургский период; Научные интересы. Коллеги; Участие в составе редколлегии журналов и комитетах конференций; Семья. Хобби. Приведены фото 1978—2021 гг.

Ключевые слова: УрФУ им. Б. Н. Ельцина, Томский институт радиоэлектроники и электронной техники, Нижний Тагил, Екатеринбург, Смольский С. М., Воторопин С. Д., Скрипаль Ан. В., Пирогов Ю. А., Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Ермолов П. П. Один из ведущих отечественных «автодинщиков» (к 75-летию профессора В. Я. Носкова) // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2023. Т. 6, № 1. С. 115—126.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Ермолов, П. П. Один из ведущих отечественных «автодинщиков» (к 75-летию профессора В. Я. Носкова) / П. П. Ермолов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2023. — Т. 6, № 1. — С. 115—126.

1. Введение

Владислав Яковлевич Носков — хорошо известный специалист в таких областях, как системы ближней радиолокации, автоколебательные системы и автодины, теория нелинейных колебаний в радиотехнике, приемопередающие устройства и антенны для систем радиолокации и связи, история радиотехники.

Тем не менее, в научном обороте до настоящего времени о его деятельности практически не было публикаций (краткую информацию [1] можно считать исключением). Настоящая работа устраняет этот пробел.

2. Школьные годы

Владислав Яковлевич Носков родился 25 января 1948 года практически в географическом центре Омской области. В 1958 году семья переехала в город Петропавловск Северо-Казахстанской области, где, начиная с седьмого класса, он увлекся радиотехникой. Сначала собирал простейшие приемники, затем — УКВ радиостанции, ходил в местный радиоклуб ДОСААФ. В девятом классе получил позывной UL7AVO, но основной интерес его был сосредоточен на конструировании все более совершенных приемопередающих устройств. Любимыми предметами в школе были физика и химия, успешно участвовал в городских олимпиадах по этим предметам. В школе увлекался спортом, был ведущим игроком сборной школы по волейболу. В индивидуальном зачете поставил рекорд области в метании копья (64 м). Постоянно участвовал в весенних кроссах за школу. В 1966 году окончил среднюю школу с уклоном на строительные специальности, получив удостоверение каменщика третьего разряда, что в дальнейшей жизни многократно пригодилось.

3. Томский институт радиоэлектроники и электронной техники

В 1966 году Владислав поступил в Томский институт радиоэлектроники и электронной техники, ТИРЭТ (ныне Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники). Будучи студентом, активно участвовал в научной работе кафедры радиоприемных устройств под руководством доцента Иннокентия Алексеевича Суслова, привившего своему подопечному вкус к научной работе. Владислав Носков активно участвовал в общественной и спортивной жизни института, был командиром студенческого строительного отряда «Рубикон». Этот отряд для детей нефтяников построил на севере Томской области здания двух школ, детского сада и другие объекты поселковой инфраструктуры. Был также капитаном сборной института по волейболу и ее играющим тренером.

Производственную практику на последнем курсе проходил на радиоаводе в городе Петропавловск Северо-Казахстанской области. Его дипломная работа была посвящена разработке УКВ-ЧМ блока для всеволновых трансляционных приемников «Зыбь» (для морского флота) и «Тарангул» (для сети районных радиоузлов). Реализованные в новом изделии

идеи позволили с помощью одного УКВ-блока перекрыть сразу два диапазона — «союзный» и «международный», что значительно упростило конструкцию приемника в целом. Применение нового в те годы принципа «обратного управления» при приеме ЧМ сигналов позволило повысить помехозащищенность радиоприема и почти в полтора раза расширить дальность устойчивого приема программ вещания на УКВ.

4. Нижнетагильский период

В. Я. Носков получил распределение на работу в Нижнетагильский институт испытания металлов (НТИИМ), где в радиотехнической лаборатории специального конструкторского бюро измерительной аппаратуры (СКБ ИЗАП) занимался разработкой радиолокационных станций для измерения начальных скоростей снарядов и мин. Был ответственным исполнителем и, далее, руководителем ряда научно-технических тем. Здесь он увлекся развитием научного направления, связанного с исследованием автодинных режимов СВЧ генераторов и их применением в системах ближней радиолокации. Для реализации ряда возникших идей по этой тематике в 1977 году перешел работать старшим научным сотрудником научно-исследовательского сектора кафедры теоретической физики Нижнетагильского государственного педагогического института (НТГПИ), совмещая научную работу с преподаванием ряда технических дисциплин (электротехника, радиотехника, основы электроники). Затем в разные годы работал старшим преподавателем, доцентом и профессором НТГПИ.

В январе 1985 года в совете при Московском государственном педагогическом институте (МГПИ) им. В. И. Ленина защитил диссертацию «Исследование одночастотных и полигармонических автодинов на полупроводниковых СВЧ диодах» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Научные руководители — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики МГПИ Евгений Михайлович Гершензон и кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической физики НТГПИ Борис Николаевич Туманов. Результаты диссертации были использованы при выполнении хозяйственных работ с рядом ведущих организаций оборонной промышленности. Среди разработок тех лет нужно отметить: радиолокационные датчики миллиметрового диапазона для обнаружения цели на заданной дальности; измерители параметров движения изделий при их аэробаллистических испытаниях; аппаратура для экспериментального определения характеристик дымов, пеноподобных составов и фонов, предназначенных для маскировки объектов на поле боя.

В последующие годы при личном участии и под руководством Владислава Яковлевича было выполнено большое число разработок различных радиолокационных датчиков и измерителей, а также устройств радиоволнового контроля параметров технологических процессов гражданского применения для промышленности, транспорта, научных исследований и охраны. Среди них: радиолокационный измеритель параметров движения локомотива; автодинные датчики для обнаружения занятости путей и устройств ограждения на железнодорожных переездах; радиолокационный измеритель скорости движения вагонов на сортировочной горке; радиолокационные системы безопасности для метрополитенов; радиоволновый датчик для определения влажности нефти при ее добыче; радиолокационный датчик параметров движения грузовой платформы парашютной системы; радиоволновый датчик для контроля размеров деталей и заготовок, измеритель уровня заполнения угольных силосов и проч. Предложенный им СВЧ датчик охранного назначения с автодинным принципом построения приемопередатчика в 90-е годы прошлого столетия серийно выпускался в НТЦ «Автодин» (г. Нижний Тагил) для оснащения систем безопасности объектов Свердловской, Омской, Тюменской и Ульяновской областей, а также Казахстана.

Совместно с научно-исследовательским институтом полупроводниковых приборов (НИИПП, Томск), конкретно, с Сергеем Дмитриевичем Воторопиным (9.10.1948—25.09.2008), были разработаны и освоены в серийном производстве завода при НИИПП автодинные модули 5-мм и 8-мм диапазонов «Тигель-05» и «Тигель-08», которые выполнены по гибридно-интегральной технологии на основе двухмезовых планарных диодов Ганна. При участии Владислава Яковлевича на базе предложенных модулей был создан целый ряд оригинальных радиолокационных систем, устройств, датчиков и измерителей КВЧ-диапазона волн, нашедших широкое применение в решении задач ближней радиолокации и связи, в измерительной технике и аппаратуре контроля технологических процессов. Среди них: датчики для бесконтактного определения скорости вращения вала судовых двигателей, амплитуды вибрации лопаток турбин газовых компрессоров, скорости горения различных композиционных материалов, скорости движения автомобиля относительно полотна дороги и др.

В 1995 году в совете при Московском государственном техническом университете гражданской авиации (МГТУГА) Владислав Яковлевич успешно защитил диссертацию «Автодины на полупроводниковых приборах СВЧ и их применение» на соискание ученой степени доктора технических наук, в которой им обобщены результаты выполненных разработок и изложены научные положения, заложившие основу новой концепции развития теории автодинных систем.

5. Екатеринбургский период

В 90-е годы Владислав Яковлевич занимался созданием систем безопасности. Кроме упомянутых выше автодинных датчиков охранного назначения им были разработаны приборы радиосигнализации, предназначенные для передачи по радиоканалу тревожных сообщений на пульт централизованного наблюдения. Эти приборы пошли на оснащение систем передачи сообщений, развернутых преимущественно в Нижнем Тагиле. Невысокая стоимость приборов была очень привлекательной для многих потребителей, что обрушило рынок этой продукции в Нижнем Тагиле для иных производителей аналогичных приборов. Еще более широкую известность в этой области Владислав Яковлевич получил благодаря разработке серии антенн для радиосистем безопасности, наиболее полно учитывающих специфику их применения на охраняемых объектах. Заказчиками этих антенн были не только местные фирмы, но и фирмы из других городов, а также технические службы вневедомственной охраны.

Поэтому сделанное в 1999 году предложение фирмы «ОКО» из Екатеринбурга стать их главным конструктором по радиотехническим устройствам и переехать в областной центр было принято вполне естественно. Начиная с 2002 года Владислав Яковлевич работает в фирме «ОКО» в упомянутом качестве и профессором кафедр сначала радиоприемных устройств, затем — технологии и средств связи, а с 2016 года — департамента радиоэлектроники и связи и, наконец, с 2018 года — кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Уральского федерального университета (УрФУ). Читает лекции и ведет практические занятия по предмету «Проектирование радиотехнических систем» образовательной программы магистратуры «Радиоэлектронные системы» направления 11.04.01 — Радиотехника.

Владислав Яковлевич является членом двух диссертационных советов по радиотехническим специальностям при УрФУ. На сегодня им подготовлено в качестве научного руководителя три аспиранта, успешно защитивших диссертации, и один докторант, подготовивший свою работу к представлению в совет. Является членом Аттестационного совета УрФУ. Постоянно привлекается к оппонированию кандидатских и докторских диссертационных работ. Всего на сегодня им опубликовано совместно с коллегами более 400 научных работ, в том числе более 100 на английском языке, получено три десятка авторских свидетельств и патентов на изобретения. Награжден знаком «Изобретатель СССР». Индекс Хирша на настоящий момент по базам данных научных публикаций: РИНЦ — 19, Scopus — 11, Web of Science — 6.

6. Научные интересы. Коллеги

Область научных интересов Владислава Яковлевича можно кратко очертить следующим образом: системы ближней радиолокации, автоколебательные системы и автодины, теория нелинейных колебаний в радиотехнике, приемопередающие устройства и антенны для систем радиолокации и связи, история радиотехники.

Очень плодотворными на общем поле научных интересов у Владислава Яковлевича сложились творческие отношения, переросшие в дружбу, с доктором технических наук, профессором Сергеем Михайловичем Смольским (2.01.1946—29.04.2020) из МЭИ [1], известным специалистом по автодинам на транзисторах и не только. Судьба распорядилась так, что в 2000 году Сергей Михайлович оказался прикован к креслу-коляске вследствие обширного инсульта. Инициатором к сближению явился упоминавшийся выше Сергей Дмитриевич Воторопин, который предложил совместно выполнить ряд исследований автодинных модулей миллиметрового диапазона, созданных на основе планарных диодов Ганна. Совместная работа по данной теме исследований, итогом которой стало появление более сотни публикаций, явилась мощной моральной поддержкой Сергея Михайловича, о чем он неоднократно упоминал. К сожалению пришедшая в Москву пандемия косвенно способствовала кончине Сергея Михайловича, что не позволило осуществлению плана написания совместной монографии.

Добрые отношения сложились у Владислава Яковлевича также с коллективом научной школы доктора физико-математических наук, профессора, заведующего кафедрой физики твердого тела Саратовского государственного университета (СГУ) имени Н. Г. Чернышевского Дмитрия Александровича Усанова (24.07.1943—5.06.2019), где изучают и используют автодинные устройства для измерения параметров материалов микроэлектроники и исследования биообъектов.

7. Участие в составе редколлегий журналов и комитетах конференций

Владислав Яковлевич является членом нескольких редколлегий научных журналов по тематике его исследований: «Infocommunications and Radio Technologies» (Севастополь), «Вестник Московского энергетического института — МЭИ» (Москва), «Journal of Electronic Research and Application» (Сидней) и «Ural Radio Engineering Journal» (Екатеринбург). Член организационных и/или программных комитетов Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology

«USBEREIT» (Екатеринбург), Международной Крымской конференции «КрыМиКо» (Севастополь), Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, ТУСУР), регионального семинара по радиоэлектронике и информационным технологиям «REIT» (Екатеринбург), Всероссийской научной школы-семинара «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами» (Саратов, СГУ).

Практически постоянный участник Международной Крымской Микроволновой Конференции «КрыМиКо» (Севастополь), привлек к участию в этой конференции преподавателей и сотрудников УрФУ. Один из редких в наши дни участников семинара «СВЧ техника и спутниковый прием», проводимого по линии общества «Знание» в начале августа 1990 года в Севастополе. В последний день этого семинара, по воспоминаниям Владислава Яковлевича, при единогласном голосовании всех присутствующих была учреждена ныне всем хорошо известная ежегодная конференция «КрыМиКо». В архиве конференции сохранилась учетная карточка В. Я. Носкова как докладчика на 2-й конференции, которая состоялась в Севастополе в октябре 1992 года (рис. 10).

Владислав Яковлевич пользуется уважением коллег как специалист высокой квалификации и как доброжелательный человек, всегда готовый помочь всем и во всем. Охотно делится идеями и планами научной работы.

8. Семья. Хобби

По словам Владислава Яковлевича он «единожды женат», имеет троих детей, семерых внуков и двоих правнуков. Поддерживает добрые отношения со всеми многочисленными родственниками и друзьями. Продолжает начатое его отцом построение генеалогического дерева по линии «Носко», одного из первых переселенцев XVI века в Сибирь.

Хобби: космология и проблемы мироздания, театр и филармония, рыбалка и фотоохота. Владиславу Яковлевичу «нравится думать о жизни, читать умные книги и приезжать в Крым».

9. Заключение

В научный оборот введены сведения об известном специалисте в областях: системы ближней радиолокации, автоколебательные системы и автодины, теория нелинейных колебаний, приемопередающие устройства и антенны для систем радиолокации и связи, история радиотехники.

Благодарности

Автор благодарит коллегу Владислава Яковлевича, В. Г. Войченко за участие в подготовке статьи.

Список литературы

1. К 70-летию профессора Носкова Владислава Яковлевича // В кн. : 28-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМи-Ко'2018 (Севастополь, 9—15 сент. 2018 г.). 2018. С. G—I.
2. Памяти профессора Смольского Сергея Михайловича // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. Вып. 2. С. 487—488.

Информация об авторе

Ермолов Павел Петрович, заведующий базовой кафедрой «Инновационная радиоэлектроника» Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем Севастопольского государственного университета, Севастополь, Российская Федерация. ORCID: 0000-0001-9089-974X.



Рис. 1. Владислав Яковлевич Носков. 2010-е гг.

Fig. 1. Vladislav Yakovlevich Noskov. 2010s



Рис. 2. В. Я. Носков — главный конструктор фирмы «ОКО». 20.10.2007

Fig. 2. V. Ya. Noskov – chief designer of the OKO company. 20.10.2007



Рис. 3. Приезд профессора Е. М. Гершензона в Нижнетагильский государственный педагогический институт (1984 г.). Слева направо: Е. М. Гершензон, Н. М. Закарлюк, Б. Н. Туманов, Б. И. Левит.

Fig. 3. The arrival of Professor Ye. M. Gershenzon to the Nizhny Tagil State Pedagogical Institute (1984). From left to right: Ye. M. Gershenzon, N. M. Zakarlyuk, B. N. Tumanov, B. I. Levit



Рис. 4. Участники испытаний первого макета автодинного датчика цели на заданной дальности, слева направо: Н. М. Закарлюк, В. А. Веснин, Б. Н. Туманов, В. Я. Носков. 1978 г.

Fig. 4. Participants in the tests of the first layout of an autodyne target sensor, from left to right: N. M. Zakarlyuk, V. A. Vesnin, B. N. Tumanov, V. Ya. Noskov. 1978

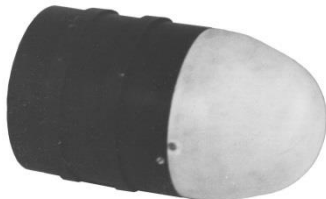


Рис. 5. Опытный образец автодинного датчика цели на заданной дальности (слева) и реактивный стенд для его полунатурных испытаний. 1980 г.

Fig. 5. Prototype of an autodyne target sensor at a given range (left) and a jet stand for its full-scale tests. 1980



Рис. 6. Друг и коллега С. Д. Воторопин
(9.10.1948—25.09.2008).

Fig. 6. Friend and colleague S. D. Votoropin
(9.10.1948—2008).



Рис. 7. Друг и коллега С. М. Смольский
(2.01.1946—29.04.2020)

Fig. 7. Friend and colleague S. M. Smolsky
(2.01.1946—29.04.2020)



Рис. 8. Пять «автодинщиков» докторов наук на ступенях Физического факультета
Саратовского государственного университета, слева направо:

Ан. В. Скрипаль, В. Я. Носков, Ю. А. Пирогов, Д. А. Усанов, Ал. В. Скрипаль. 2018 г.

Fig. 8. Five doctors of sciences on the steps of the Faculty of Physics of the Saratov State University, from left to right: An. V. Skripal, V. Ya. Noskov, Yu. A. Pirogov, D. A. Usanov, Al. V. Skripal. 2018



Рис. 9. В. Я. Носков (слева) — участник 31-й конференции КрыМиКо. 2021 г.
Fig. 9. V. Ya. Noskov (left) – participant of the 31st conference CriMiCo. 2021

К

Шифр мероприятия _____

УЧЕТНАЯ КАРТОЧКА ДОКЛАДЧИКА

Фамилия, имя, отчество Носков Владислав Яковлевич

Ученая степень к.ф.-м.н. звание доцент

Наименование организации НТИ «Автодин»

Занимаемая должность зам. директора по научн. работе

Служебный адрес: Индекс 622031 гор. Нижний Тагил
ул. Красногвард. дом 57 телефон 25-64-33

Домашний адрес: Индекс 622015 гор. Нижний Тагил Свердлов.
ул. Кастийская дом 5 кв. 39 телефон 29-15-85

Год рождения 1948 Количество детей 3

Личная подпись докладчика [Signature]

ИК - " 7 " 10 1992 года К-92
28-3, 29-3

Рис. 10. Учетная карточка участника 2-й конференции КрыМиКо. 1992 г.
Fig. 10. Registration card of the participant of the 2nd conference CriMiCo. 1992

One of the Leading Domestic “Autodiners” (to the 75th Anniversary of Professor V. Ya. Noskov)

P. P. Yermolov

Sevastopol State University
33, Universitetskaya st., Sevastopol, Russian Federation, 299053
yermolov@icrtjournal.com

Received: March 17, 2023

Peer-reviewed: March 24, 2023

Accepted: March 24, 2023

Abstract: *A brief description of the life and work of Vladislav Yakovlevich Noskov, one of the leading domestic “autodiners”, professor of the Ural Federal University named after First President of Russia B. N. Yeltsin. The article presents sections: School years; Tomsk Institute of Radioelectronics and Electronic Technology; Nizhny Tagil period; Ekaterinburg period; Scientific interests. Colleagues; Participation in the editorial boards of journals and conference committees; Family. Hobby. Photos from 1978–2021 are shown.*

Keywords: *UrFU n. a. B. N. Yeltsin, Tomsk Institute of Radioelectronics and Electronic Engineering, Nizhny Tagil, Ekaterinburg, Smolsky S. M., Votoropin S. D., Skripal An. V., Pirogov Yu. A., Usanov D. A., Skripal Al. V.*

For citation (IEEE): P. P. Yermolov, “One of the Leading Domestic “Autodiners” (to the 75th anniversary of Professor V. Ya. Noskov),” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 115–126, 2023, doi: 10.29039/2587-9936.2023.06.1.10. (In Russ.).

References

- [1] “To the 70th anniversary of Professor Noskov Vladislav Yakovlevich,” in : 28th Intern. Crimean Conf. “Microwave engineering and telecommunication technologies” – CriMiCo’2018 (Sevastopol, September 9–15, 2018), pp. G–I, 2018. (In Russ.).
- [2] “In memory of Professor Sergey Mikhailovich Smolsky,” *Microwave and Telecommunication Technology*, iss. 2, pp. 487–488, 2020. (In Russ.).

Information about the author

Pavel P. Yermolov, Head of the Basic Department “Innovative Radio Electronics” of the Institute of Radio Electronics and Intelligent Technical Systems, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-9089-974X.