

От квантового сопротивления Холла к резисторам квадратурного моста

Ю. П. Семенов¹, Е. В. Кривицкая², И. А. Самодуров³

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

¹Y.P.Semenov@vniim.ru, ²E.V.Krivitskaya@vniim.ru, ³I.A.Samodurov@vniim.ru

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования основных этапов передачи единицы электрического сопротивления (Ом) от квантового сопротивления Холла (12,9 кОм) на постоянном токе к резисторам (100 кОм) квадратурного моста на частоте 1.5915 кГц. Сравниваются результаты измерений с помощью различных моделей цифровых мостов на основе компараторов постоянного тока и переходной меры (типа Nanon) 10x10 кОм. Частотные поправки резисторов 100 кОм определяются методом «частотной экстраполяции» с использованием уникального расчетного резистора 95 кОм и цифрового измерителя RLC. Исследована модель резистора квадратурного моста с пренебрежимо малой частотной зависимостью. Установлено, что наибольший вклад (до $18 \cdot 10^{-8}$) в погрешности резисторов 100 кОм вносит передача единицы от 10 кОм к 100 кОм на постоянном токе. Рассмотрена возможность снижения этой составляющей неопределенности в 4–5 раз.

Ключевые слова: резистор, квадратурный мост, квантовое сопротивление Холла, мосты на основе компараторов постоянного тока (DCCB)

I. ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования показывают, что точность измерений резисторов 100 кОм квадратурного моста на постоянном токе недостаточна для обеспечения требуемой точности воспроизведения единицы электрической емкости, – относительное расхождение достигает $18 \cdot 10^{-8}$ при сопоставлении результатов измерений, выполненных с использованием различных эталонов и средств измерений, хотя неопределенность каждого отдельного результата в большинстве случаев на порядок меньше.

Выявленный факт несоответствия точности является естественным следствием повышения требований к точности измерений сопротивления при проведении работ по совершенствованию государственного первичного эталона единицы электрической емкости ГЭТ 25. Исходная точность единицы электрического сопротивления обеспечивается применением квантового сопротивления Холла (КСХ), точность которого теоретически ничем не ограничена, и точностью конкретной реализации квантового эффекта Холла (КЭХ). Точность реализации КЭХ в РФ вполне достаточна для обеспечения всех практических потребностей отечественной науки и промышленности в точных измерениях электрического сопротивления. Эти потребности находят своё отражение в государственной поверочной схеме, и нет никаких свидетельств несоответствия между требованиями поверочной схемы и их практической реализацией. Единство в области измерений сопротивления в стране поддерживается иерархией эталонов, каждый из которых хранит единицу в соответствии со своим статусом и номинальным значением, причём наиболее высокая точность может быть достигнута сличением мер одинакового

номинального значения. В соответствии с такой системой передачи и хранения единицы наивысшая точность измерения сопротивления 100 кОм обеспечивается непосредственным сличением с мерами группового эталона 100 кОм в составе ГЭТ, показатели точности которого нормируются следующим образом:

1. значение среднеквадратичного отклонения суммарной погрешности при 10 независимых измерениях не должно превышать $1 \cdot 10^{-7}$;
2. значение суммарной стандартной неопределенности при 10 независимых измерениях не должно превышать $1 \cdot 10^{-7}$;
3. значение относительно нестабильности сопротивления эталона – копии не должно превышать $2 \cdot 10^{-7}$.

Очевидно, что указанное выше расхождение экспериментальных результатов измерения резисторов квадратурного моста 100 кОм полностью соответствуют требованиям системы обеспечения единства измерений в РФ, но совершенно непригодны для использования в работах по воспроизведению единицы электрической емкости в соответствии с обновлённой системой SI. Далее рассматриваются некоторые предложения для практического достижения необходимой точности измерений сопротивления 100 кОм.

II. ПЕРЕДАЧА ЕДИНИЦЫ ОТ КСХ И ЕЕ ХРАНЕНИЕ

Единица электрического сопротивления, воспроизводится государственным первичным эталоном ГЭТ 14-2014 на основе реализации квантового эффекта Холла. Относительная суммарная неопределенность воспроизведения единицы составляет $1,0 \cdot 10^{-8}$ при измерении сопротивления второго плато ($i=2$) квантового сопротивления Холла $R = 12,90640373 \dots$ кОм.

Воспроизведение единицы осуществляется на постоянном токе в условиях криогенной температуры (1,3 К) и сильного магнитного поля (7,5 Тл), которые достигаются применением жидкого гелия и откачкой его паров. Высокая и постоянно возрастающая стоимость жидкого гелия и достаточно большое его количество (минимально 100 литров, что определяется необходимостью поддержания сверхпроводящего состояния обмотки мощного магнита) обуславливают большие промежутки времени между очередными работами по воспроизведению, обычно – один год. Современное состояние науки и технологий предлагает различные способы повышения доступности измерений КСХ – от применения графенов до использования аппаратуры непрерывного цикла.

Но в РФ эти способы не применяются, КСХ реализуется один раз в году, а в течение остального времени единица поддерживается (сохраняется) посредством эталонных резисторов 1 и 10 кОм, значения

которых определяются в процессе воспроизведения. Долговременная стабильность резисторов на два (и более) порядка ниже стабильности (воспроизводимости значения) КСХ, поэтому для повышения надежности сохранения единицы на уровне точности, приближающемуся к воспроизведению, используется иерархически система передачи единицы эталонным мерам различного номинального значения от 1 Ом до 10 кОм.

Эта система сложилась еще до открытия КЭХ и учитывала реальные условия ее функционирования, основным из которых являлось использование мер и измерительной аппаратуры исключительно отечественного производства. С тех пор многое изменилось, но сама иерархическая схема и ее реальное наполнение приборами практически не претерпели изменений, возможно, из-за отсутствия запросов общества.

Для повышения надежности хранения единицы предусмотрены групповые эталоны, применение которых основано на предположении о наличии у каждой меры индивидуального тренда изменения сопротивления во времени и случайном характере отклонения от него. Тогда становится возможным отбор мер для группового эталона после предварительного исследования трендов по критерию взаимной компенсации. Возможно, что такой подход «работал» некоторое время при доступной в тот момент точности, но в дальнейшем оказалось, что высокотехнологичные изделия имеют одинаковый (в первом приближении) тренд для всех экземпляров однотипных изделий, т. е. практически лучше применить один высококачественный эталон, чем группу эталонов более низкого качества (эта хорошо подтверждается историей действующего группового эталона – копии 1 Ом).

Необходимость длительного хранения единицы сопротивления отпадает при обеспечении постоянного доступа к КСХ, но это связано с совершенствованием ГПЭ единицы электрического сопротивления и требует значительных финансовых затрат.

В соответствии с ГПЭ точность, с которой могут быть определены действительные значения резисторов квадратурного моста 100 кОм, не может быть гарантирована выше, чем значение, определяемое нестабильностью группового эталона-копии $1 \cdot 10^{-7}$.

Указанное значение нестабильности, являющееся лишь одной из составляющих бюджета неопределенности мер квадратурного моста, в 10 раз превышает допустимое значение суммарной неопределенности $2 \cdot 10^{-8}$, что делает невозможным выполнение требования ТЗ к точности воспроизведения единицы электрической емкости.

Поэтому в работах по совершенствованию ГЭТ 25 придается применить не лучший, но быстро реализуемый подход для обеспечения необходимой точности измерения резисторов 100 кОм квадратурного моста на постоянном токе.

III. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В СТРУКТУРНОЙ СХЕМЕ ПЕРЕДАЧИ И ХРАНЕНИЯ ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

В составе комплекса аппаратуры для совершенствования ГЭТ 25 предусмотрено применение

системы передачи и хранения единицы сопротивления, включает в себя:

- меры 12,9 кОм для имитации КСХ при экспериментальной отработке техники измерений, хранении единицы и верификации моста;
- меры высшей стабильности 1 Ом для резервного хранения единицы;
- меры 1 кОм, 10 и 100 кОм для верификации моста и хранения единицы;
- цифровой мост-компаратор для измерения сопротивления (на основе компаратора постоянных токов), позволяющий проводить калибровки и верификации методами перестановки и «замыкания треугольника»;
- воздушные термостаты с локальной стабильностью температуры 0,004 К.

IV. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕДИНИЦЫ, СОХРАНЯЕМОЙ СОВОКУПНОСТЬЮ ЭТАЛОНОВ 1 КОМ, 10 КОМ И 12,9 КОМ

Наивысшую точность хранения единицы, воспроизводимой посредством реализации КЭХ, в МБМВ и в большинстве НМИ мира обеспечивают эталоны с номинальным значением 1 Ом, конструкция и технология изготовления которых были разработаны в NML (НМИ Австралии) [1], [2]. Их резистивный элемент из сплава Эваном отличаются крайне малой (на уровне единиц 10^{-8}) зависимостью от температуры и давления. В составе создаваемой системы две меры 1 Ом, изготовленные по указанной технологии канадской фирмой MI [3], будут осуществлять резервное хранение единицы в периоды между измерениями КСХ.

Передача единицы от эталонов 1 Ом резисторам квадратурного моста 100 кОм будут выполняться посредством цифрового моста-компаратора для измерения сопротивления (на основе компаратора постоянных токов) модели 6640Q (Guildline) [4].

При выполнении рутинных работ по воспроизведению единицы электрической емкости было бы слишком громоздким осуществлять передачу Ома на пять порядков от эталонов 1 Ом, поэтому предусмотрено применение эталонов 1, 10 и 12,9 кОм, значения которых могут быть измерены непосредственным сличением с КСХ. Совокупность этих эталонов можно рассматривать как групповой эталон, содержащий разно-номинальные меры, а необходимые внутригрупповые сличения этих мер будут выполняться мостом 6640Q. Возможность выполнения таких измерений является одной из особенностей моста 6640Q, основные метрологические характеристики которого представлены в табл. 1.

Значение неопределенности, указанное в табл. 1, относится к отношению токов через измеряемые резисторы (т. е. не включает неопределенность значения эталона RS) и относятся к режиму тока 77 мкА через КСХ.

ТАБЛИЦА I ХАРАКТЕРИСТИКИ МОСТА-КОМПАРАТОРА 6640Q

RS / RX (Любой из них может быть выбран в качестве эталона)	Неопределенность отношения, ±ppm				
	Перестановка 1:1	0,1:1 ²	1:1	10:1	13,4:1
1 Ом	0,015	0,05	0,02	0,02	0,02
10 Ом	0,15	0,02	0,02	0,02	0,02
100 Ом	0,015	0,02	0,02	0,02	0,02
1 кОм	0,015	0,02	0,02	0,02	0,02
10 кОм	0,02	0,02	0,03	0,05	0,05

Примечание: Неопределенности 0,02 ppm основаны на взаимозамене соединений Rs и Rx (т. е. Rx / Rs);

Из спецификации следует важное свойство моста 6640Q – меры с номинальными значениями 1, 10, 12,9 и 100 кОм могут быть измерены сравнением между собой с одинаковой неопределенностью 0,02 ppm. Это свойство позволяет использовать комбинацию результатов резисторов различного номинального значения как для хранения единицы, так и для калибровки) отношений моста.

V. КАЛИБРОВКА (ВЕРИФИКАЦИЯ) МОСТА НА ОСНОВЕ КОМПАРИРОВАНИЯ ПОСТОЯННЫХ ТОКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ПЕРЕСТАНОВКИ И «ЗАМКЫВАНИЯ ТРЕУГОЛЬНИКА»

При измерении равно-номинальных эталонов (т. е. в отношении 1:1) высокая относительная точность их измерений может быть достигнута применением метода взаимной перестановки двух резисторов в плечах моста. Метод перестановки позволяет очень быстро и точно экспериментально проверить данные, приведённые в спецификации измерительного моста. Для осуществления калибровки 1:1 необходимо только наличие двух мер сопротивления, значения которых остаются неизменными в пределах 0,01 ppm в течение 24 часов. Основным допущением метода перестановки является неизменность измерительной схемы и режима (ток, количество витков) моста. Результат калибровки – неопределенность (ошибка отношения) e_1 рассчитывается как:

$$e_1 = (1/2) \times [(R1/R2) \times (R2/R1) - 1] \times 10^{-6} \text{ ppm},$$

где (R1/R2) – показания моста.

Уникальной особенностью моста 6640Q является постоянное значение погрешности при измерении и перестановке резисторов, сопротивление которых не равны, но относятся к одному диапазону, например, 10 кОм и 12,9 кОм. Эта особенность позволяет выполнять также калибровку мер сопротивления, значения которых отличается на порядок (10:1). Эта процедура условно обозначается как «метод замыкания треугольника».

Например, при наличии трёх резисторов – 1 кОм, 10 кОм и 12,9 кОм – при их попарном измерении будут получены три отношения (показания моста):

$$R_A = 1/12,9; R_B = 1/10 \quad R_C = 10/12,9$$

Эти отношения позволяют рассчитать «невязку», т. е. суммарную ошибку трёх отношений:

$$e_c = (1/3) \times [R_A - (R_B \times R_C / R_A)] \times 10^{-6} \text{ ppm},$$

где коэффициент (1/3) отражает предположение о равной вероятности появления ошибки при каждом трёх измерении (возможно, что это не совсем так, поскольку

два отношения R_A и R_B относятся к одному диапазону, а R_C – к другому).

Методы перестановки и «замыкания треугольника» экспериментально опробованы с применением моста 6640Q и эталонов с номинальными значениями 10–100 кОм.

При перестановке резисторов 10 и 12,9 кОм получено значение ошибки отношения моста 0,005 ppm (!).

Результаты измерений методом «замыкания треугольника» с использованием мер 10 кОм, 13 кОм и 100 кОм модели 9334 (Guildline) приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА II

RS / RX	Отношение	Ток, мА	Обозначение	Std. Dev., ppm	e_1
100:10	10,00000748	0,07	R_A	0,01	0,032
100:13	7,74809314	0,07	R_B	0,04	
13:10	1,29064123	0,077	R_C	0,02	

Рассчитанное значение ошибки составило 0,032 ppm (в худшем случае, если считать, что ошибка 13:10 на порядок меньше, то ошибка передачи единицы мере 100 кОм равна 0,048 ppm).

Действительные значения сопротивления, измеренные позже в тот же день, приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА III

Номинальное значение	Измеренные значения	Std. Dev., ppm
10 кОм	9,9999966	0,002
13 кОм	12,9064094	0,007
100 кОм	99,9999276	0,04

Ошибка аналогичных измерений мер 1 кОм, 10 кОм и 12,9 кОм составила 0,017 ppm.

Исследования систематической погрешности на двух этапах выполнения метода «замыкания» будут продолжены с применением переходной меры ПМС-8, разработанной в 70-х годах прошлого века. Мера содержит 10 одинаковых резисторов 10 кОм и реализует принцип последовательно- параллельного переключения (Hamon). Потенциально достижимая точность может быть оценена неопределенностью перехода порядка $(4-8) \cdot 10^{-8}$.

VI. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ АТТЕСТАЦИИ МЕР СОПРОТИВЛЕНИЯ 100 КОМ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Результаты выполненных ранее исследований, показали преимущества применения металлофольговых smd-компонентов для создания мер 100 кОм квадратурного моста по сравнению с применением герметизированных резисторов Vishay. Резисторы Vishay нашли преимущественное применение в квадратурных мостах большинства зарубежных НМИ [5], [6], [7], [8] вследствие их стабильности и устойчивости к механическим воздействиям (вибрация, транспортная тряска), а также возможности индивидуального заказа резисторов с допуском менее от 0,005 %. Их недостатками при использовании на переменном токе являются неприемлемо большой (для квадратурного моста) фазовый угол и плавающий потенциал металлического экрана. Для уменьшения влияния этих недостатков обычно применяются схемы компенсации

фазового угла за счёт использования T – цепи из двух последовательного соединения резисторов и конденсаторов. Применением компенсации существенно увеличивается зависимость сопротивления от частоты (поправка к значению, измеренному на постоянном токе).

На предыдущем этапе работ во ВНИИМ разработана другая модель резистора квадратного моста, – на основе последовательно соединённых smd-резисторов, установленных на основании из фольгированного фторопласта (Ф-4). Минимизация фазового угла достигается изменением длины экрана (слоя металлизации на основании), а подгонка сопротивления к номинальному значению – индивидуальным отбором серийных smd-резисторов с подгонкой $\pm 0,05\%$. Экспериментальные исследования показали, что частотные поправки и фазовый угол модели ВНИИМ значительно меньше, чем у конвенциональных резисторов, а процедура подгонки – существенно проще.

Исследования частотной зависимости этой модели осуществлялось методом «частотной экстраполяции» [9] с применением цифрового RLC-метра, предварительная калибровка которого выполнена с применением бифилярного резистора с расчётной частотной характеристикой (РРЧХ). Наибольшее номинальное значение всех известных РРЧХ не превышает 12,9 кОм, т.е. калибровка RLC-метра и измерение резистора 100кОм осуществлялись на различных диапазонах измерений – «30 кОм» и «100 кОм» соответственно. Возможность экспериментальной проверки погрешности, вносимой различием диапазонов измерения и калибровки прибора, появилась только после окончания работ по воссозданию РРЧХ с сопротивлением 95 кОм. Ранее было известно, что в восьмидесятых годах прошлого века в результате совместных работ ВНИИМ и НИИ Микропровод (Кишинев) были изготовлены три экземпляра РРЧХ 100 кОм. Технология создания резистивных элементов подобных резисторов утрачена, а сами резисторы не сохранились вследствие крайней хрупкости бифилярных элементов из микропровода с диаметром резистора проводника менее 10 мкм в условиях приложения продольного натяжения для поддержания формы бифиляра. Макет резистора 95 кОм воссоздан из аналогичного микропровода с использованием оригинальной структуры токопроводов, но без приложения растягивающего усилия, что не позволяет гарантировать форму резистивного элемента и приводит лишь к приближенной оценке размеров бифиляра.

Конструктивные параметры исходной меры: длина бифиляра 90 мм, диаметр микропровода 10 мкм, расстояние между проводниками 40 мм, внутренний диаметр экрана 80 мм; характеристики микропровода – удельное сопротивление проводника 1,4 мкОм·м, температурный коэффициент сопротивления $1 \cdot 10^{-5}/\text{К}$. По результатам исследований исходной меры указаны следующие характеристики: постоянная времени $1,56 \cdot 10^{-8}$ с, частотная поправка $8 \cdot 10^{-9}$ при частоте 1 кГц и $3 \cdot 10^{-6}$ при частоте 20 кГц.

Результаты измерений восстановленного резистора показывают, что зависимость сопротивления от частоты может быть представлена квадратичной функцией:

$$R_p(f) = R_0 \cdot (1 + 9,2305 \cdot 10^{-3} f^2 + a \cdot f^3 + \dots),$$

где R_0 – сопротивление постоянному току, $R_p(f)$ – сопротивление при частоте f (в МГц), коэффициент $a \ll 1$.

Полученные результаты (табл. 4) в пределах 20 % совпадают с приведёнными выше результатами оценки характеристик исходного РРЧХ, что подтверждает его расчетную природу несмотря на отступление формы ее резистивного элемента от строго бифилярной. РРЧХ 95 кОм применен для измерений частотных поправок резистивных элементов 100 кОм резисторов Н2-2.

VII. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОТОТИПА РЕЗИСТОРА КВАДРАТУРНОГО МОСТА

Выше упоминался разработанный во ВНИИМ макет резистивного элемента 100 кОм на основе металло-фольговых чип-резисторов. При продолжении работ выявлены преимущества другой конструктивной схемы, применённой в серийно выпускаемых мерах сопротивления Н2-2.

Результаты измерений меры Н2-2 показывают, что ее частотная зависимость может быть представлена функцией:

$$R_p(f) = R_0(1 + 0,715 \cdot 10^{-3} f^2 + a \cdot f^3 + \dots),$$

В табл. 4 сопоставлены основные характеристики РРЧХ 95 кОм, разработанного во ВНИИМ макета 100 кОм и меры Н2-2 100 кОм при рабочей частоте квадратного моста 1,592 кГц.

ТАБЛИЦА IV

Резистор	Коэффициент квадратичного члена, (1/МГц ²)	Постоянная времени (τ), с	Поправка при частоте 1,592 кГц (отн. ед.)
РРЧХ 95 кОм	$9,230 \cdot 10^{-3}$	$1,48 \cdot 10^{-8}$	$23,4 \cdot 10^{-9}$
Макет 100 кОм (4 чипа)	$4,01 \cdot 10^{-3}$	$0,32 \cdot 10^{-8}$	$10,2 \cdot 10^{-9}$
Мера Н2-2 100 кОм	$0,715 \cdot 10^{-3}$	$0,11 \cdot 10^{-8}$	$1,81 \cdot 10^{-9}$

Применение в квадратном мосте резисторов по схеме Н2-2 позволит использовать их значения, измеренные на постоянном токе, без учета частотной поправки.

В состав меры Н2-2 100 кОм входит резистор 1 МОм, кратковременная нестабильность которого может ограничить точность измерения сопротивления на постоянном токе.

Проведены исследования возможности точных измерений меры Н2-2 100 кОм посредством моста постоянного тока модели 6622А XPR с использованием отношения 1:10. Измерения выполнены при температуре $(20,00 \pm 0,05)^\circ\text{C}$ при токе 0,07 мА через измеряемый резистор.

Действительное значение эталона $R_s = 9999,9142$ Ом определено ранее в процессе измерения КСХ. Измеренное значение $R_d = 99996,835$ Ом.

Относительное СКО результата составляет 0,04 ppm при 30 измерениях, что не отличается от значений этого параметра при измерении наиболее стабильных эталонов 100 кОм.

VIII. Выводы

Показано, что основными факторами, ограничивающими точность измерения на постоянном токе эталонных мер сопротивления 100 кОм квадратного моста, являются недостаточная стабильность группового эталона 100 кОм в составе

ГЭТ 14-2014 и недостаточная точность передачи единицы в отношении 1:10 от группового эталона 10 кОм.

Предложено осуществлять передачу единицы от КСХ мерам 100 кОм с использованием мер сопротивления нового поколения 1 Ом, 1, 10, 13 и 100 кОм и цифрового моста, для калибровки которого применяется метод «замыкания треугольника».

Экспериментально показано, что частотная поправка резистивных элементов 100 кОм (Н2-2) пренебрежимо мала при частоте 1592 Гц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. J. Pritchard and R. C. Grime, "Fabrication of Reference Standard 1 Ohm Resistors from Evanohm S Alloy", CPEM 1990 Conf. Digest, Ottawa, Canada, pp. 290-291, June 1990
- [2] В. J. Pritchard and G. W. Small, "Temperature coefficient variations in heat treated Evanohm and their effect on the transient behaviour of the NML 1 ohm resistor", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 42, No.2, pp. 557-561, April 1993.
- [3] <https://www.guilde.com>
- [4] <https://mintl.com>
- [5] L. Callegaro, V. D'Elia, and B. Trinchera. Realization of the farad from the dc quantum Hall effect with digitally assisted impedance bridges. Metrologia, vol. 47, pp. 464–472, 2010
- [6] F. Delahaye and R. Goebel. Evaluation of the frequency dependence of the resistance and capacitance standards in the BIPM quadrature bridge. // IEEE Trans. Instrum. Meas. April 2005. vol. 54, no. 2
- [7] A. Domaev, Y. Nakamura and T. Oe. Development of Quadrature Bridge for AC QHR Measurements at Measurement Frequency of 1.592 kHz. IEEE Trans. Instrum. Meas., 60, no.7, July. 2011, 2602 – 2608.
- [8] P.C. Coogan, J.M. Darlow, J.R. Fiancée, and G.W. Small. 200 kΩAC resistance transfer standards. Metrologia, vol38, no.6, pp. 503 – 507. Dec. 2001.
- [9] Ю.П. Семенов, Е.В. Кривицкая. Определение частотных характеристик резисторов квадратурного моста // Труды 76-й научно-технической конференции Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио, Журнал «СПБНТОРЭС: труды ежегодной НТК», выпуск 1 (76), 2021 г., стр. 322-326