

УДК 621.371.32

**М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, О.А. Матвеев**

## **ТЕМ-камера для оценки уровней помехоэмиссии и помехоустойчивости радиоэлектронных средств с возможностью исследования биологических объектов в диапазоне частот до 2 ГГц**

*Разработана и создана малогабаритная ТЕМ-камера для исследования и испытания объектов размером до  $20 \times 100 \times 100$  мм, в области электромагнитной совместимости, в диапазоне частот до 2 ГГц с максимальным значением частотной зависимости  $|S_{11}|$  минус 20 дБ. Приведены согласующиеся результаты частотных зависимостей  $|S_{11}|$ , полученные при помощи измерения и электродинамического анализа. Выполнено сравнение характеристик разработанной ТЕМ-камеры и её ближайших аналогов. Приведены результаты вычисления частотной зависимости эффективности экранирования корпусом камеры при разных формах кромки испытательного стола. Представлены результаты применений ТЕМ-камеры для радиотехнических и биомедицинских исследований.*

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, ТЕМ-камера, численное моделирование, эффективность экранирования, помехоэмиссия, помехоустойчивость, биомедицина

### **Введение**

Одним из традиционных средств для испытания радиоэлектронных средств (РЭС) на электромагнитную совместимость (ЭМС) являются устройства на основе симметричной линии передачи – ТЕМ-камеры [1]. В зависимости от их характеристик, возможны исследования эффективности экранирования (ЭЭ) материалов [2], кабелей [3], корпусов компонентов [4] и блоков [5], измерения наводок на произвольно ориентированные микрополосковые линии [6, 7], испытания функциональных узлов и небольших устройств в целом согласно стандартам IEC [8, 9], SAE [10], MIL [11]. Исследования влияния, в ТЕМ-камере, импульсного электрического поля высокой амплитуды с наносекундной длительностью (3–300 нс) также нашли применение в биомедицинских исследованиях, например в лечении рака и генной терапии [12]. Однако, физические механизмы, лежащие в основе взаимодействия наносекундного импульсного электрического поля с живыми клетками, тканью или органами, до сих пор не ясны и активно исследуются [13–15]. Таким образом, ТЕМ-камеры широко применяются при исследованиях и испытаниях как в области радиотехники, так и в биомедицине [16–18]. Поэтому совершенствование ТЕМ-камер и испытаний в целом [19] остаётся актуальной задачей, которая решается научным сообществом в настоящее время.

Совершенствование ТЕМ-камер связано с их гибридизацией с реверберационной [20] и климатической [21–24] камерами, а также расширением диапазона рабочих частот и увеличением внутреннего испытательного пространства. Диапазон рабочих частот ТЕМ-камеры достаточно широк, от постоянного тока до частоты моды  $TE_{11}$ , с которой возбуждаются высшие типы ТЕ и ТМ волн, что приводит к неконтролируемому воздействию на испытуемый объект (ИО). Размеры возможных ИО зависят от внутреннего испытательного пространства, увеличение которого снижает верхнюю граничную частоту, а, следовательно, ограничивает возможность применения камеры по диапазону рабочих частот, при котором возможно проводить измерения. Для одного из возможных решений этой задачи разработана методика с алгоритмом оптимизации [25] и с ее помощью получены оптимальные геометрические размеры конструкции ТЕМ-камеры, на основе которых могут быть созданы ТЕМ-камеры с верхней граничной частотой 0,5–8 ГГц при высоте ИО 80–5 мм, соответственно [26]. Применение методики позволит создать ТЕМ-камеру для климатической экранированной камеры [21, 22], в которой она является испытательным контейнером, а также превзойти характеристики существующих аналогов (табл. 1).

Цель работы – создать малогабаритную ТЕМ-камеру с минимальной неравномерностью электромагнитного поля в увеличенном полезном объёме камеры и максимальной эффективностью его экранирования от внешнего излучения в диапазоне частот до 2 ГГц.

Таблица 1

Характеристики существующих ТЕМ-камер ( $Z = 50$  Ом)

| Параметр      | IFI CC-110EXX [16] | FCC-ТЕМ-JM3 [17] | TekBox ТВТС 1 [18] |
|---------------|--------------------|------------------|--------------------|
| $f$ , МГц     | 2000               | 2000             | 2000               |
| КСВН          | 1,25               | 1,25             | 1,33               |
| Высота ИО, мм | 18                 | 10               | 16,7               |

## Результаты вычисления и измерения

На основе результатов работы [25] выполнена сборка экспериментального макета ТЕМ-камеры с вырезом под испытательный стол (рис. 1). Конструкция полностью сваривалась, красилась и отдельные части (крепеж под соединитель и стягивающее кольцо) промазывались медной пастой. Центральная пластина припаивалась к центральным проводникам СВЧ соединителя, а держатель соединителя и испытательный стол на краях промазывались медной пастой. Выполнено измерение частотной зависимости  $|S_{11}|$  (рис. 2), при помощи измерителя модуля коэффициента передачи и отражения Р2М-40.

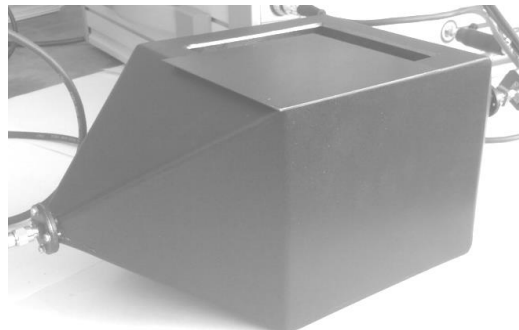


Рис. 1. Экспериментальный макет ТЕМ-камеры с испытательным столом

Вычислены частотные зависимости  $|S_{11}|$  для электродинамической (э.м.) и твердотельной (т.м.) моделей ТЕМ-камеры с испытательным столом при помощи метода матрицы линии передачи (МЛП) и метода конечных элементов (МКЭ) [25]. Отличием твердотельной модели являлся учет неравномерности кромок, возникающих в результате реза металла, его изгиба, сварки и прочего. Модели имели вырез с фаской  $45^\circ$  под испытательный стол. При моделировании учитывалась щель 0,1 мм между корпусом и испытательным столом. Соединение корпуса и испытательного стола осуществлялось при помощи восьми точечных элементов сопротивлением 0,1 Ом каждый, что имитировало контакт испытательного стола и корпуса, во втором случае значение сопротивлений было увеличено до 100 Ом, что имитировало слой окисления металла и максимально возможное сопротивление медной пасты.

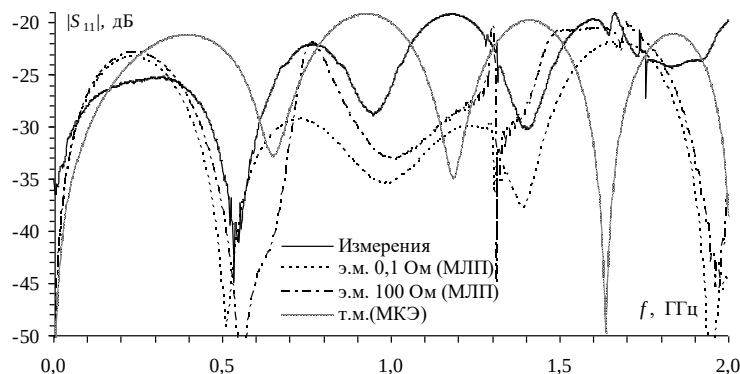


Рис. 2. Измеренная и вычисленные частотные зависимости  $|S_{11}|$  для ТЕМ-камеры с вырезом и соединением испытательного стола с корпусом при помощи элементов с сопротивлением 0,1 Ом и 100 Ом (вычисления)

Из рис. 2 видно, что максимальное значение измеренной частотной зависимости  $|S_{11}|$  для макета с вырезом под испытательный стол не превышает минус 19,1 дБ, в полосе частот до 2 ГГц, что соответствует, с разницей в 0,4 дБ, максимальному значению  $|S_{11}|$  для твердотельной модели. Вычисленные максимальные значения для электродинамической модели при соединении испытательного стола к корпусу через элементы с сопротивлением 100 Ом близки к измеренным, с той же разницей, и не превышают значения  $|S_{11}|$  минус 19,9 дБ, тогда как для электродинамической модели это значение составляет минус 21,9 дБ. Отклонение значений  $|S_{11}|$ , в диапазоне частот 0,6–1,3 ГГц, между вычисленными и измеренными значениями, объяснимы тем, что реальные геометрические размеры поперечного сечения на одном из концов экспериментального макета камеры оказались соответствующими вычисленным ( $a' = 8,3 \pm 0,1$  мм,  $b' = 7,2 \pm 0,1$  мм), тогда как на другом не соответствующими ( $a' = 8,8 \pm 0,1$  мм,  $b' = 7,1 \pm 0,1$  мм) [25]. Также, анализ частотных зависимостей  $|S_{11}|$  показал (рис. 2), что неравномерности вблизи 1,3 ГГц, связаны с размерами испытательного стола (100 мм) и центральной пластины (106,2 мм), а вблизи 1,6–1,8 ГГц – с длиной сужающейся части камеры. Последняя неравномерность также наблюдается у ТЕМ-камеры без испытательного стола [25]. Критическая частота камеры соответствует ширине поперечного сечения 140 мм и равна 2,1 ГГц.

По идентичным чертежам изготовлен второй макет ТЕМ-камеры, у которого реальные размеры незначительно изменились (с одного конца  $a' = 8,2 \pm 0,1$  мм,  $b' = 7,3 \pm 0,1$  мм, с другого  $a' = 8,1 \pm 0,1$  мм,  $b' = 7,2 \pm 0,1$  мм), но при этом оказались ближе к вычисленным значениям. Причина подобных отличий в реальных конструкциях заключалась в том, что в результате сварки размеры начала и конца для каждой камеры неконтролируемо выходили за заданные пределы. Также выполнена корректировка зазора, от 0,5 до 0,1 мм, между испытательным столом и корпусом, для обеих ТЕМ-камер. Измерения (рис. 3) обоих макетов проводились без медной пасты на гранях испытательного стола.

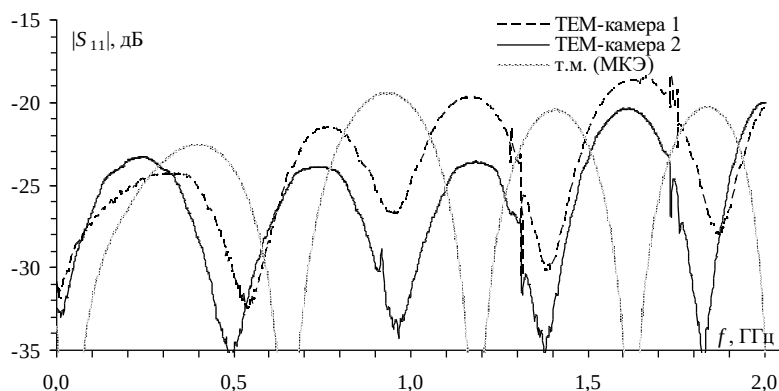


Рис. 3. Измеренные частотные зависимости  $|S_{11}|$  для первого и второго экспериментальных макетов ТЕМ-камеры с испытательным столом

Из рис. 3 видно, что у первого макета максимальное значение  $|S_{11}|$  составило минус 17,9 дБ, а у второго снизилось до минус 20 дБ, что может объясняться меньшим разбросом геометрических параметров в начале и конце камеры.

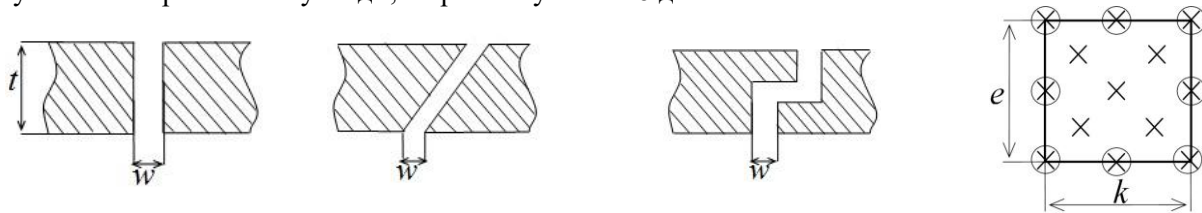
Таким образом, разработана и создана конструкция ТЕМ-камеры, отклонение между измеренными и вычисленными максимальными значениями  $|S_{11}|$  которой не превышает  $\pm 0,5$  дБ. Геометрические размеры конструкции могут быть линейно изменены и использоваться для создания ТЕМ-камер для ИО разной высоты.

#### Эффективность экранирования корпусом ТЕМ-камеры

Вычислена эффективность экранирования (ЭЭ) корпусом ТЕМ-камеры для трех форм граней испытательного стола: с углами  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ , а также со ступенчатым вырезом (рис. 4, а–в). Вычисление ЭЭ проводилось при воздействии плоской волны со стороны испытательного стола: без него (сплошная стенка в регулярной части) и с ним, при ширинах щели 0,1 и 0,5 мм. Эти значения имитировали допуск на раскрой металла, а также плотное (0,1 мм) и неплотное (0,5 мм) прижатия граней испытательного стола к граням выреза в корпусе камеры. Вырезы сделаны таким образом, чтобы исключить углубление испытательного стола внутрь камеры. Для электродинамической модели, соединения испытательного стола с корпусом камеры выполнялись по периметру при помощи восьми сопротивлений, расположенных на углах и кромках выреза корпуса и испытательного стола (рис. 4, г). Значения

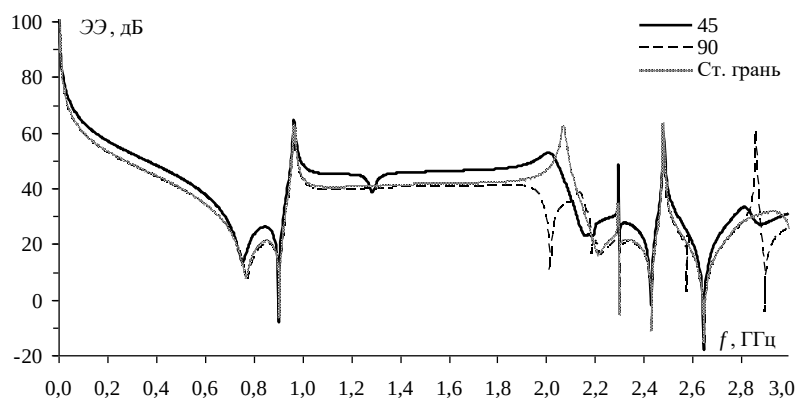
напряженности электрического поля вычислялись при помощи электродинамического анализа, используя 65 точечных мониторов поля, расположенных по всему объему  $20 \times 100 \times 100 \text{ мм}^3$  испытательного пространства: по 13 датчиков на высотах: 1, 5, 10, 15, 20 мм (рис. 4,з).

Получено более 200 частотных зависимостей ЭЭ в диапазоне частот до 3 ГГц. В центре камеры на расстоянии 1 мм от испытательного стола, в диапазоне частот до 2 ГГц, при фаске испытательного стола  $45^\circ$  ЭЭ составила не менее 42 дБ, тогда как при ступенчатой грани – 33 дБ, а с прямым углом – 31 дБ. На расстоянии 20 мм от испытательного стола, при фаске  $45^\circ$  ЭЭ составила не менее 19 дБ, при ступенчатой грани – 11 дБ, с прямым углом 12 дБ. Наихудшие значения наблюдались непосредственно возле щели (0,1 мм) между испытательным столом и корпусом камеры. На расстоянии 20 мм от щели, при фаске испытательного стола  $45^\circ$  значения ЭЭ составляли не менее 5 дБ, при ступенчатой грани – минус 1 дБ, с прямым углом – 0 дБ.



**Рис. 4. Формы граней испытательного стола с нижней стенкой корпуса ТЕМ-камеры: под углами  $90^\circ$ (а),  $45^\circ$ (б), ступенчатая (в). Расположение точечных мониторов электрического поля (x) над испытательным столом внутри камеры и элементов сопротивлений в апертуре между корпусом и испытательным столом камеры (o) (г)**

На рис. 5 показаны наихудшие частотные зависимости ЭЭ, для трех разных граней испытательного стола, при расположении точечных мониторов поля в центре (рис. 4,з) на расстоянии 20 мм в глубине камеры.



**Рис. 5. Наихудшие частотные зависимости ЭЭ корпусом ТЕМ-камеры с  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  и ступенчатой гранями испытательного стола**

Из рис. 5 видно, что при наихудшем случае экранирования, в диапазоне частот до 2 ГГц, грань (рис. 4,б) под углом  $45^\circ$  имеет более высокие значения частотной зависимости ЭЭ, чем грани под углом  $90^\circ$  (рис. 4,а) и ступенчатая (рис. 4,в). Также обобщающий анализ всех полученных зависимостей ЭЭ показал, что испытательный стол под углом граней  $45^\circ$  более предпочтителен по сравнению с остальными формами. Поэтому при сборке для данных макетов сделана фаска под угол  $45^\circ$  на гранях выреза корпуса камеры и испытательного стола. Наихудшее значение ЭЭ составляет минус 10 дБ, в диапазоне частот до 2 ГГц. ЭЭ в рабочем диапазоне частот может быть повышена при помощи применения дополнительных экранирующих прокладок и вставок, размещенных в щели между столом и корпусом камеры.

#### **Сравнение характеристик разработанной ТЕМ-камеры и аналогов**

Сравнение полученных характеристик с существующими аналогами осуществлялось по основным параметрам: высоте ИО и максимальному значению  $|S_{11}|$ . По результатам измерения разработанная камера ( $f = 2000 \text{ МГц}$ , КСВН = 1,22, высота ИО 20 мм) превышала характеристики существующих (табл. 1) по высоте ИО и максимальному значению КСВН. Также, было выполнено сравнение (рис. 6) измеренных характеристик разработанной ТЕМ-камеры с характеристиками, полученными посредством электродинамического моделирования [27] камеры FCC-ТЕМ-М2, которая применяется в соответствии со стандартом SAE J 1752/3 [10] при измерениях эмиссий от интегральных схем.

Из рис. 6 видно, что верхняя граничная частота для разработанной ТЕМ-камеры составляет 2,1 ГГц, тогда как для промышленной 1,85 ГГц. Также максимальное значение  $|S_{11}|$  для разработанной камеры меньше на 6 дБ в диапазоне частот до 1 ГГц и на 12 дБ – до 1,5 ГГц. Максимальное значение  $|S_{21}|$  для разработанной камеры плавно снижается до значения минус 1 дБ с ростом частоты до 2 ГГц, тогда как для промышленной не ниже минус 0,2 дБ, что может быть вызвано различием потерь в металле при вычислительном и натурном экспериментах.

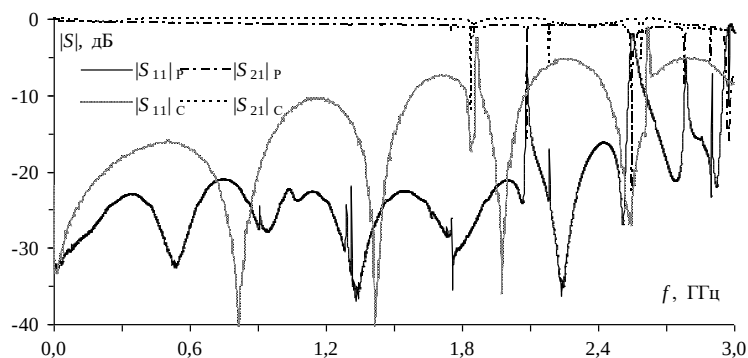


Рис. 6. Частотные зависимости S-параметров ТЕМ-камер: измерение разработанной ( $|S_{11}|_p$ ,  $|S_{21}|_p$ ) и электродинамическое моделирование камеры FCC-ТЕМ-JM2 из [27] ( $|S_{11}|_c$ ,  $|S_{21}|_c$ )

С помощью разработанной ТЕМ-камеры и измерительного приемника Rohde&Schwarz ESR (рис. 7), выполнено измерение эмиссии ЭМП сотового телефона модели SAMSUNG-I9250. Результаты измерений показали, что на центральной частоте 944,56 МГц, в полосе 222 кГц, измеряемый уровень не превышает 30 дБмкВ (с учетом включенного аттенюатора 10 дБ).

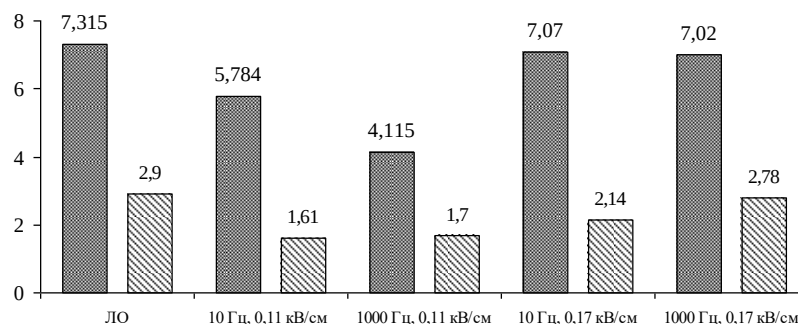


Рис. 7. Измерение эмиссии ЭМП от сотового телефона в ТЕМ-камере

Также, исследовано влияние импульсного ЭМП на функциональное состояние митохондрий печени мышей в ТЕМ-камере [28]. В качестве источника воздействия использовался генератор импульсного напряжения ГИН-1-1 (FID Technology) с регулируемой амплитудой напряжения (от 700 до 1000 В) и частотой повторения импульсов (от 10 до 1000 Гц), с временем нарастания 90 пс и длительностью (по половине амплитуды) импульса 300 пс. В качестве биологического объекта (БО) использовались облученные и ложно облученные (ЛО) суспензии митохондрий. Последние подвергались аналогичным манипуляциям, что и облученные, но без включения источника воздействия. Показатели каждого воздействия были измерены в 6 экспериментах. Значимость различия в показателях дыхания облученных и ЛО митохондрий оценивалась в программе StatSoft STATISTICA 6.0 с помощью U-критерия Манна–Уитни.

Суспензии изолированных митохондрий подвергались однократному воздействию 4000 импульсов с частотами повторения 10 Гц и 1000 Гц и напряженностью электрического поля 0,11 кВ/см и 0,17 кВ/см. Измерение скорости потребления кислорода изолированными митохондриями проводилось с помощью измерителя кислорода АКПМ-02Л (Россия), снабженного амперометрическим сенсором АСрО<sub>2</sub>-01 и полярографической ячейкой объемом 1,3 мл с постоянным перемешиванием содержимого. В ячейку помещалась среда инкубации, содержащая кислород, сахарозу, MgCl<sub>2</sub> и KН<sub>2</sub>РO<sub>4</sub> (рН 7,4) [29], в которую добавлялось 50 мкл суспензии митохондрий, содержащей около 1 мг белка.

Скорость дыхания рассчитывалась в наномолях  $O_2$  в минуту на 1 мг белка. Для оценки функционального состояния митохондрий рассчитывался коэффициент дыхательного контроля по Чансу [30] (отношение скорости нефосфорилирующего дыхания при наличии в среде инкубации дыхательного субстрата сукцината в отсутствии аденозиндифосфата (АДФ) к скорости фосфорилирующего дыхания при наличии сукцината и АДФ). Получены результаты влияния параметров импульса на коэффициент дыхательного контроля и изменение скорости потребления кислорода (рис. 8).



**Рис. 8.** Показатели коэффициента дыхательного контроля (●) и изменения скорости потребления кислорода (▨) (нмоль  $O_2$ /мин на мг белка) митохондриями после облучения пикосекундными импульсами в ТЕМ-камере

Выявлена тенденция к снижению уровня дыхания митохондрий по данным коэффициента дыхательного контроля при облучении импульсами с частотой повторения 1000 Гц и напряженностью поля 0,11 кВ/см. Воздействие на суспензии митохондрий сверхкороткими импульсами с напряженностью электрического поля 0,17 кВ/см и частотами 10 Гц и 1000 Гц сравнимо по показателям с ЛО образцами. Воздействия с частотами 10 Гц и 1000 Гц при напряженности поля 0,11 кВ/см индуцировали снижение скорости потребления кислорода. Полученные данные указывают на важность комбинации факторов воздействия с различными характеристиками частоты и напряженности электрического поля. Однако следует отметить, что изменение уровня потребления кислорода митохондриями в большей степени зависело от напряженности электрического поля, чем от частоты импульсов.

Снижение коэффициента дыхательного контроля свидетельствует о разобщении окисления и фосфорилирования в облученных митохондриях, что, возможно, ведёт к угнетению синтеза АТФ [31].

Выявлены значимые отличия по показателям изменения скорости потребления кислорода митохондриями. Как показано на рис. 8, наиболее эффективное сочетание параметров воздействия в отношении снижения скорости составили 10 Гц и 0,11 кВ/см, при которых скорость снизилась с 2,90 нмоль  $O_2$ /мин. на мг белка ( $\pm 0,14$ ) до 1,61 ( $\pm 0,12$ ) нмоль  $O_2$ /мин. на мг белка ( $p \leq 0,05$ ).

Снижение скорости дыхания может быть связано с различными механизмами: нарушением работы белков-переносчиков электронов по электронно-транспортной цепи (ЭТЦ), белков-антипортеров АДФ/АТФ [32], ингибированием работы ферментативных комплексов ЭТЦ, нарушением целостности мембран митохондрий [33], а также их набуханием [34].

Таким образом, показано, что воздействие импульсов длительностью 300 пс с частотой повторения 10 Гц и амплитудой напряженности электрического поля 0,11 кВ/см значимо влияет на снижение скорости потребления кислорода митохондриями. Скорость фосфорилирующего дыхания облученных митохондрий оказалась в 1,5 раза ниже по сравнению с ЛО образцами.

### Заключение

Получена модель и описана конструкция ТЕМ-камеры, отклонение между измеренными и вычисленными максимальными значениями  $|S_{11}|$  которой не превышает  $\pm 0,5$  дБ в диапазоне частот до 2 ГГц. Создана ТЕМ-камера с характеристиками выше, чем у стандартной и существующих, и пригодная для исследования и испытания согласно стандартам на помехоэмиссии и помехоустойчивость ИС, небольших радиоэлектронных средств, а также биологических объектов, представляющих собой клетки и ткани живых организмов и растений. Также она может быть использована в качестве испытательного контейнера для климатической экранированной камеры для проведения исследований на совместные климатические и электромагнитные воздействия в ее внутреннем объеме. Камера имеет максимальное значение  $|S_{11}|$ , по результатам измерений, минус 20 дБ, в диапазоне частот до 2 ГГц, при максимальной высоте ИО 20 мм. Вычислены значения ЭЭ и напряженности электрического поля

в центре ТЕМ-камеры. Наихудшее значение ЭЭ, в данном диапазоне составляет, по результатам моделирования, минус 10 дБ, что может быть повышено при помощи применения дополнительных экранирующих прокладок и вставок.

Выполнено сравнение существующих аналогов и разработанной ТЕМ-камеры, подтвердившее, что примененные в ней конструкторские решения, полученные при помощи предложенной ранее методики оптимизации геометрических размеров, позволяют получить более высокие характеристики ТЕМ-камер в диапазоне частот до 2 ГГц. ТЕМ-камера пригодна для измерений помехоэмиссии и помехоустойчивости небольших РЭС, в том числе интегральных схем, а также исследования влияния импульсного ЭМП на биологические объекты. Для увеличения полезного объема камеры, под высоту ИО до 40 мм, представленные размеры могут быть линейно увеличены в два раза, при этом полоса рабочих частот камеры уменьшится до 1 ГГц, а максимальное значение  $|S_{11}|$  не изменится.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.*

### Список литературы

1. Crawford M.L. Generation of standard EM fields using TEM transmission cells // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. –1974. – Vol. 16, № 4. – P. 189–195.
2. Catrysse J. Expanding the frequency range of the TEM-t cell for the measurement of shielding materials up to 12 GHz / J. Catrysse, F. Vanhee, D. Pissort, R. Dewitte // Int. Symp. Electromagn. Compat. (EMC EUROPE); Rome, Italy, 17–21 Sept. 2012. – Rome, 2012. –P. 1–6.
3. Жегов Н.А. Сравнение методов исследования эффективности экранирования бортовых кабелей летательных аппаратов / Н.А. Жегов, В.Ю. Кириллов, А.В. Клыков, М.В. Марченко, М.М. Томилин – Технологии ЭМС. –2015. – №1(52). – С. 44–48.
4. Park S-H. Analysis of EMI reduction methods of DC-DC buck converter / S-H. Park, H-A. Huynh, S-Y. Kim // IEEE 10th Int. Workshop on the Electromagn. Compat. of Integrated Circuits (EMC Compo); Edinburgh, UK, 10–13 Nov. 2015. – Edinburgh, 2015. –P. 92–96.
5. Senic D. Shielding effectiveness measurements in resonant enclosure using mode-tuned and mode-stirred method / D. Senic, A. Sarolic // 21st Int. Conf. on Applied Electromagn. and communications (ICECom); Dubrovnik, Croatia, 14–16 Oct. 2013. – Dubrovnik, 2013. –P. 1–4.
6. Mandic T. Characterizing the TEM cell electric and magnetic field coupling to PCB transmission lines / T. Mandic, R. Gillon, B. Nauwelaers, A. Baric – IEEE Trans. Electromagn. Compat. – 2012. – Vol. 54, № 5. – P. 976–985.
7. Shi C. Using termination effect to characterize electric and magnetic field coupling between TEM cell and microstrip line / C. Shi, W. Fang, C. Chai, Y. Huang, Y. En, Y. Yang, Y. Liu, Y. Chen, X. Liao // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. – 2015. –Vol. 57, Iss. 6. – P. 1338–1344.
8. Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Immunity. Part 2: Measurement of Radiated Immunity, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 62132-2, First Edit., 2010. 43 с. – URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6508> (дата обращения: 13.07.2018).
9. Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Emissions. – Part 2: Measurement of Radiated Emissions, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 61967-2, First Edit., 2005. 49 с. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6185> (дата обращения: 13.07.2018).
10. Measurement of radiated emissions from integrated circuits TEM/Wideband TEM (GTEM) Cell Method; TEM Cell (150 kHz to 1 GHz), Wideband TEM Cell (150 kHz to 8 GHz). SAE J 1752/3:2017-09-22, 2017. 16 с. URL: <https://www.beuth.de/en/standard/sae-j-1752-3/280447657> (дата обращения: 13.08.2018).
11. MIL-STD-461G. Department of defense interface standard: Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment, 2015. 266 с. URL: [http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-461G\\_53571/](http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-461G_53571/) (дата обращения: 13.08.2018).
12. Kohler S. Experimental Microdosimetry Techniques for Biological Cells Exposed to Nanosecond Pulsed Electric Fields Using Microfluorimetry / S. Kohler, R.P. O'Connor, T-D-T. Vu, P. Leveque, D. Arnaud-Cormos // IEEE Trans. on Microw. Theory and Tech. – 2013. – Vol. 61, № 5. – P. 2015–2022.

13. De Pomerai D. Microwave radiation induces a heat-shock response and enhances growth in the nematode *Caenorhabditis elegans* / D. De Pomerai, C. Daniells, H. David, J. Allan, I. Duce, M. Mutwakil, D. Thomas, P. Sewell, J. Tattersall, D. Jones, P. Candido // *IEEE Trans. on Microw. Theory and Techn.* – 2000. – Vol. 48, № 11. – P. 2076–2081.
14. Ticaud N. Specific Absorption Rate Assessment Using Simultaneous Electric Field and Temperature Measurements / N. Ticaud, S. Kohler, P. Jarrige, L. Duvallet, G. Gaborit, R.P. O'Connor, D. Arnaud-Cormos, P. Leveque // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.* – 2012. – Vol. 11. – P. 252–255.
15. Busygina A.V. Problems of investigations in sphere of electromagnetic fields impact on biological objects / A.V. Busygina, M.E. Komnatnov, O.A. Matveyenko // 17th Int. Conf. on Biomedical Engineering and Computational Techn. (SIBIRCON), 2015, pp. 50–54. doi: 10.1109/SIBIRCON.2015.7361848
16. Instruments for industry, TEM cell [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ifi.com/images/stories/pdfs/TEM\\_Cells\\_IFI\\_CC\\_series.pdf](http://www.ifi.com/images/stories/pdfs/TEM_Cells_IFI_CC_series.pdf), свободный (дата обращения 13.07.2018).
17. Fischer Custom Communications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fischercc.com/product/tem-cell-stripline/>, свободный (дата обращения 13.07.2018).
18. TekBox [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tekbox.net/test-equipment/open-tem-cells>, свободный (дата обращения 13.07.2018).
19. Комнатнов М.Е. О совместных климатических и электромагнитных испытаниях радиоэлектронной аппаратуры / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2014. – №4(34). – С. 39–45.
20. Podgorski A.S. New concept of hybrid TEM-cell and reverberation chamber facility // *IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC)*; Pittsburgh, PA, USA, 6–10 Aug. 2012. – Pittsburgh, 2012. –P. 239–244.
21. Пат. 2 558 706 РФ, МПК G12B 15/00; G12B 17/00; H05K 7/20; H05K 9/00. Климатическая экранированная камера / М.Е. Комнатнов (РФ), Т.Р. Газизов (РФ). – №2 014 103 639 / 07; заявл. 03.02.14; опубл. 10. 08.15, Бюл. № 22. – 16 с.
22. Пат. 2 627 985 РФ, МПК G12B 9/02; G01R 1/04. Камера для совместных климатических и электромагнитных воздействий на биологический объект / М.Е. Комнатнов (РФ), Т.Р. Газизов (РФ), А.В. Бусыгина (РФ), А.А. Собко (РФ), А.В. Осинцев (РФ), О.А. Матвеев (РФ) – №2 015 141 198; заявл. 28.09.2015; опубл. 14.08.17, Бюл. № 23. – 26 с.
23. Komnatnov M.E. Environmental shielded TEM chamber for biomedical testing / M.E. Komnatnov, T.R. Gazizov // *IEEE MTT-S Intern. Microw. Workshop Series on RF and Wireless Techn. Biomed. Health. Applic. IMWS-BIO*; London, England, 5–8 Dec. 2014. – London, 2014. –P. 1–4.
24. Комнатнов М.Е. Камера для совместных климатических и электромагнитных испытаний электронных компонентов / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // *Техника радиосвязи.* –2014. – №3(23). – С. 84–91.
25. Комнатнов М.Е. Оптимизация геометрических параметров ТЕМ-камеры / М.Е. Комнатнов, Т.Т. Газизов – *Технологии ЭМС.* –2016. – №4 (59). – С. 7–16.
26. Пат. 2 606 173 РФ, МПК H01P 1/00. ТЕМ-камера / М.Е. Комнатнов (РФ), Т.Р. Газизов (РФ) – №2 015 156 668; заявл. 28.12.15; опубл. 10.01.17, Бюл. № 1. – 9 с.
27. Deng S. An Experimental Investigation of Higher Order Mode Suppression in TEM Cells / S. Deng, D. Pommerenke, T. Hubing, D. Shin – *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* – 2008. – Vol. 50, №2. – P. 416–419.
28. Matveyenko O.A. Study of impact of picosecond pulses on functional status of mitochondria of mice liver in TEM-cell / O.A. Matveyenko, M.E. Komnatnov, A.V. Busygina, L.P. Zharkova // *IEEE 17th Int. Conf. Micro/Nanotech. Electron. Devices EDM*; Erlagol, Russia, 30 June–4 July 2016. –Novosibirsk, 2016. – P. 657–660.
29. Князева И.Р. Оценка влияния наносекундных рентгеновских импульсов на функциональную активность митохондрий печени мышей / И.Р. Князева, М.А. Медведев, В.В. Иванов, Л.П. Жаркова, О.П. Кутенков, В.В. Ростов, М.А. Большаков – *Бюллетень сибирской медицины.* –2012. – №1. – С. 33–38.
30. Chance B. Electron transfer: Pathways, mechanisms, and controls – *Journal of Biological Chemistry*, – 1977. –№ 46. –P. 967–980.



31. Frandsen S.K. Calcium electroporation: Evidence for differential effects in normal and malignant cell lines, evaluated in a 3D spheroid model / S.K. Frandsen, L. Gibot, M. Madi, J. Gehl, M.-P. Rols // *PLOS ONE*, –2015. –№ 10. –P. 1–11.
32. Bernadi P. The mitochondrial permeability transition pore: channel formation by F-ATP synthase, integration in signal transduction, and role in pathophysiology / P. Bernardi, A. Rasola, M. Forte, G. Lippe // *Physiol. Rev.*, –2015. –№ 12. –P. 1111–1155.
33. Joshi R.P. Bioelectric effects of intense ultrashort pulses / R.P. Joshi, K.H. Schoenbach // *Crit. Rev. Biomed. Eng.*, –2010. –Vol. 38, № 3. –P. 255–304.
34. Жаркова Л.П. Изменение объема митохондрий печени мышей после воздействия наносекундных импульсно-периодических микроволнового и рентгеновского излучений / Л.П. Жаркова, В.В. Иванов, И.Р. Князева, А.В. Керя, О.П. Кутенков, В.В. Ростов, М.А. Большаков // *Вестн. Том. гос. ун-та. Биология*. –2011. –№ 3(15). –С. 161–170.

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), проспект Ленина, 40, 634050, Томск, Российская Федерация*

#### Авторы

**Комнатнов Максим Евгеньевич**, к.т.н., каф. ТУ, ТУСУР, с.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС», тел: (3822) 41-34-39, эл. почта: maxmek@mail.ru;

**Газизов Тальгат Рашитович**, д.т.н., г.н.с., зав. каф. ТУ, ТУСУР, тел: (3822) 41-34-39, эл. почта: talgat@tu.tusur.ru;

**Матвеев Ольга Альбертовна**, к.б.н., н.с., НИЛ «БЭМС РЭС», тел: (3822) 41-34-39, эл. почта: alterra@inbox.ru.

---

*Komnatnov M.E., Gazizov T.R., Matveyenko O.A.*

#### **The TEM cell for assessment of radioelectronic equipment of emission and immunity with the possibility of studying biologic objects in the frequency range up to 2 GHz**

**Abstracts.** A compact TEM cell for tests on electromagnetic compatibility of small objects has been developed and manufactured. These parameters were used to build a TEM cell with the maximum value of  $|S_{11}|$  frequency dependence being equal to minus 20 dB in the range of frequencies up to 2 GHz for size of a test area  $20 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ . The consistent results of the frequency dependences of  $|S_{11}|$  obtained by means of measurement and electromagnetic analysis are given. We compared the characteristics of the developed TEM cell and of its analogs. The results of calculating the frequency dependence of shielding effectiveness of the cell with various edges of the test table are presented. The results of the TEM cell applications for electronic and biomedical research are presented.

**Key words:** electromagnetic compatibility, TEM cell, numerical modeling, shielding effectiveness, emission, immunity, biomedical research.

#### References

1. Crawford M.L. Generation of standard EM fields using TEM transmission cells. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* 1974, vol. 16, iss. 4, pp. 189–195. doi: 10.1109/TEM.1974.303364
2. Catrysse J., Vanhee F., Pissort D., Dewitte R. Expanding the frequency range of the TEM-t cell for the measurement of shielding materials up to 12 GHz. *Int. Symp. Electromagn. Compat. (EMC EUROPE)*, 2012, pp. 1–6. doi: 10.1109/EMCEurope.2012.6396855
3. Zhegov N.A., Kirillov V.Y., Klykov A.V., Marchenko M.V., Tomilin M.M. Svravneniye metodov issledovaniya effektivnosti ekranirovaniya bortovykh kabeley letatel'nykh apparatov [Comparison of research methods of shielding efficiency of on-board cables of flying vehicles]. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti [Technologies of electromagnetic compatibility]*, 2015, vol. 52, no. 1, pp. 44–48. (In Russia)
4. Park S-H., Huynh H-A., Kim S-Y. Analysis of EMI reduction methods of DC-DC buck converter. *Proc. 10th Int. Workshop on the Electromagn. Compat. of Integrated Circuits (EMC Compo)*, 2015, pp. 92–96. doi: 10.1109/EMCCompo.2015.7358337

5. Senic D., Sarolic A. Shielding effectiveness measurements in resonant enclosure using mode-tuned and mode-stirred method. Proc. 21st Int. Conf. on Applied Electromagn. and communications (ICECom), 2013, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICECom.2013.6684735
6. Mandic T., Gillon R., Nauwelaers B., Baric A. Characterizing the TEM cell electric and magnetic field coupling to PCB transmission lines. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 2012, vol. 54, iss. 5, pp. 976–985. doi: 10.1109/TEM.2012.2193888.
7. Shi C., Fang W., Chai C., Huang Y., En Y., Yang Y., Liu Y., Chen Y., Liao X. Using termination effect to characterize electric and magnetic field coupling between TEM cell and microstrip line. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* 2015, vol. 57, iss. 6, pp. 1338–1344. doi: 10.1109/TEM.2015.2459063
8. Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Emissions. Part 2: Measurement of Radiated Emissions, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 61967-2. First Edition, 2005. 43 p. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/6185> (accessed: 13 Aug. 2018).
9. Integrated Circuits. Measurement of Electromagnetic Immunity. Part 2: Measurement of Radiated Immunity, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method, IEC 62132-2. First Edition, 2010. 49 p. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/6508> (accessed 13 Aug. 2018).
10. Measurement of radiated emissions from integrated circuits TEM/Wideband TEM (GTEM) Cell Method; TEM Cell (150 kHz to 1 GHz), Wideband TEM Cell (150 kHz to 8 GHz). SAE J 1752/3:2017-09-22. SAE Int. Publ., 2017. 16 p. Available at: <https://www.beuth.de/en/standard/sae-j-1752-3/280447657> (accessed 13 Aug. 2018).
11. MIL-STD-461G. Department of defense interface standard: Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. 2015. 266 p. Available at: [http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-461G\\_53571/](http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-461G_53571/) (accessed 13 Aug. 2018).
12. Kohler S., O'Connor R.P., Vu T-D-T., Leveque P., Arnaud-Cormos D. Experimental microdosimetry techniques for biological cells exposed to nanosecond pulsed electric fields using microfluorimetry. *IEEE Trans. on Microw. Theory and Tech.* 2013, vol. 61, iss. 5, pp. 2015–2022. doi: 10.1109/TMTT.2013.2252917.
13. De Pomerai D., Daniells C., David H., Allan J., Duce I., Mutwakil M., Thomas D., Sewell P., Tattersall J., Jones D., Candido P. Microwave radiation induces a heat-shock response and enhances growth in the nematode *Caenorhabditis elegans*. *IEEE Trans. on Microw. Theory and Techn.*, 2000, vol. 48, iss 11, pp. 2076–2081. doi: 10.1109/22.884198.
14. Ticaud N., Kohler S., Jarrige P., Duvillaret L., Gaborit G., O'Connor R.P., Arnaud-Cormos D., Leveque P. Specific Absorption Rate Assessment Using Simultaneous Electric Field and Temperature Measurements. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, vol. 11, pp. 252–255. doi: 10.1109/LAWP.2012.2189748.
15. Busygina A.V., Komnatnov M.E., Matveyenko O.A. Problems of investigations in sphere of electromagnetic fields impact on biological objects. 17th Int. Conf. on Biomedical Engineering and Computational Techn. (SIBIRCON), 2015, pp. 50–54. doi: 10.1109/SIBIRCON.2015.7361848
16. Instruments for industry, TEM cell (2018). Available at: [http://www.ifi.com/images/stories/pdfs/TEM\\_Cells\\_IFI\\_CC\\_series.pdf](http://www.ifi.com/images/stories/pdfs/TEM_Cells_IFI_CC_series.pdf) (accessed 13 July 2018).
17. Fischer Custom Communications (2018). Available at: <https://www.fischercc.com/product/tem-cell-stripline/> (accessed 13 July 2018).
18. TekBox (2018). Available at: <http://www.tekbox.net/test-equipment/open-tem-cells>, (accessed 13 July 2018).
19. Komnatnov M.E., Gazizov T.R. O sovместnykh klimaticheskikh i elektromagnitnykh ispytaniyakh radioelektronnay apparatury [On joint climatic and electromagnetic testing of radioelectronic equipment]. *Doklady TUSUR [Proceedings of TUSUR]*, 2014. vol. 34, no 4, pp. 39–45. (In Russia)
20. Podgorski A.S. New concept of hybrid TEM-cell and reverberation chamber facility. IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC), 2012, pp. 239–244. doi: 10.1109/ISEMC.2012.6351777
21. Komnatnov M.E., Gazizov T.R. Klimaticheskaya ekranirovannaya kamera. [Climatic screened camera]. Patent RF, no. 2558706, 2014.
22. Komnatnov M.E., Gazizov T.R. Environmental shielded TEM chamber for biomedical testing. IEEE MTT-S Intern. Microw. Workshop Series on RF and Wireless Techn. Biomed. Health. Applic. *IMWS-BIO*, 2014, pp. 1–3. doi:10.1109/IMWS-BIO.2014.7032462

23. Komnatnov M.E., Gazizov T.R., Busygina A.V., Sobko A.A., Osintsev A.V., Matveyenko O.A., Kamera dlya sovmestnykh klimaticheskikh i elektromagnitnykh vozdeystviy na biologicheskiy ob'yekt [Camera for joint climatic and electromagnetic impacts on biological objects]. Patent RF, no. 2627985, 2017.
24. Komnatnov M.E., Gazizov T.R. Kamera dlya sovmestnykh klimaticheskikh i elektromagnitnykh ispytaniy elektronnykh komponentov [Chamber for joint environmental and electromagnetic testing of electronic components]. *Tekhnika radiosvyazi [Technika radiosvâzi]*, 2014, vol. 23, no. 3, pp. 84–91. (In Russia)
25. Komnatnov M.E., Gazizov T.T. Optimizatsiia geometricheskikh parametrov TEM-kamery [Optimization of geometrical parameters of TEM cell]. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti [Technologies of electromagnetic compatibility]*. – 2016. – №4 (59). – pp. 7–16. (In Russia)
26. Komnatnov M.E., Gazizov T.R. TEM-kamera [TEM cell]. Patent RF, no. 2606173, 2017.
27. Deng S., Pommerenke D., Hubing T., Shin D. An experimental investigation of higher order mode suppression in TEM cells. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.*, 2008, vol. 50, no 2, pp. 416–419. doi: 10.1109/TEM.2008.919028.
28. Matveyenko O.A., Komnatnov M.E., Busygina A.V., Zharkova L.P. Study of impact of picosecond pulses on functional status of mitochondria of mice liver in TEM-cell. *17th Int. Conf. Micro/Nanotech. Electron. Devices EDM*, 2016, pp. 657–660. doi: 10.1109/EDM.2016.7538818.
29. Knyazeva I.R., Medvedev M.A., Ivanov V.V., Zharkova L.P., Kutenkov O.P., Rostov V.V., Bol'shakov M.A. Otsenka vliyaniya nanosekundnykh rentgenovskikh impul'sov na funktsional'nuyu aktivnost' mitokhondriy pecheni myshey [The effects of nanosecond X-ray pulses on functional activity]. *Byulleten' sibirskoy meditsiny [Bulletin of Siberian Medicine]*, 2012, no. 1, pp. 33–38. (In Russian) doi: 10.20538/1682-0363-2012-1-33-38
30. Chance B. Electron transfer: Pathways, mechanisms, and controls. *Annual Review of Biochemistry*, 1977, no. 46, pp. 967–980. doi: 10.1146/annurev.bi.46.070177.004535
31. Frandsen S.K., Gibot L., Madi M., Gehl J., Rols M.-P. Calcium electroporation: Evidence for differential effects in normal and malignant cell lines, evaluated in a 3D spheroid model. *PLOS ONE*, 2015, no. 10, pp. 1–11. doi: 10.1371/journal.pone.0144028.
32. Bernardi P., Rasola A., Forte M., Lippe G. The mitochondrial permeability transition pore: channel formation by F-ATP synthase, integration in signal transduction, and role in pathophysiology. *Physiol. Rev.*, 2015, no. 12, pp. 1111–1155. doi: 10.1152/physrev.00001.2015.
33. Joshi R.P., Schoenbach K.H. Bioelectric effects of intense ultrashort pulses. *Crit. Rev. Biomed. Eng.*, 2010, vol. 38, no. 3, pp. 255–304. doi: 10.1615/CritRevBiomedEng.v38.i3.20.
34. Zharkova L.P., Ivanov V.V., Knyazeva I.R., Kereya A.V., Kutenkov O.P., Rostov V.V., Bol'shakov M.A. Izmeneniye obyema mitokhondriy pecheni myshey posle vozdeystviya nanosekundnykh impul'sno-periodicheskikh mikrovolnovogo i rentgenovskogo izlucheniya [Changes in volume of mouse liver mitochondria after exposure to nanosecond pulsed-periodic microwave and x-rays]. *Vestn. Tom. gos. un-ta. Biologiya [Tomsk State University Journal of Biology]*, 2011, vol. 15, no. 3, pp. 161–170. (In Russia)

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Pr. Lenina, 40, 634050 Tomsk, Russian Federation

## Authors

**Komnatnov Maxim Evgen'evich**, PhD, assistant professor of television and control (TU) chair, senior scientist researcher of scientific research laboratory «Security and electromagnetic compatibility of radioelectronic equipment» (SRL «SEMC REE») TUSUR, Pr. Lenina, 40, 634050 Tomsk, Russian Federation, tel: (3822) 41-34-39, e-mail: maxmek@mail.ru;

**Gazizov Talgat Rashitovich**, Doctor of technical Sciences, chief research fellow, head of TU chair, TUSUR, Pr. Lenina, 40, 634050 Tomsk, Russian Federation, tel: (3822) 41-34-39, e-mail: talgat@tu.tusur.ru;

**Matveyenko Ol'ga Al'bertovna**, PhD, scientist researcher of SRL «SEMC REE» TUSUR, Pr. Lenina, 40, 634050 Tomsk, Russian Federation, tel: (3822) 41-34-39, e-mail: alterra@inbox.ru.