

УДК 621.3.014.12

## **Исследование частотной зависимости электрического сопротивления проводников с композитной структурой\***

**С.Ю. БУВАКОВ<sup>1</sup>, Д.В. СУВОРОВ<sup>2</sup>, Г.П. ГОЛОЛОБОВ<sup>3</sup>, Д.Ю. ТАРАБРИН<sup>4</sup>,  
Е.В. СЛИВКИН<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1, Рязанский государственный радиотехнический университет, аспирант кафедры промышленной электроники. E-mail: lilbuv@mail.ru

<sup>2</sup> 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1, Рязанский государственный радиотехнический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: dmitriy\_suvorov@mail.ru

<sup>3</sup> 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1, Рязанский государственный радиотехнический университет, кандидат технических наук, доцент. E-mail: gololobov.gennady@yandex.ru

<sup>4</sup> 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1, Рязанский государственный радиотехнический университет, кандидат технических наук. E-mail: tarabrin dmitriy@gmail.com

<sup>5</sup> 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1, Рязанский государственный радиотехнический университет, ведущий инженер. E-mail: e.slivkin@mail.ru

В настоящее время в связи с интенсивным развитием импульсной техники и высокочастотной силовой электроники актуальной задачей является исследование систем и устройств, имеющих сильную зависимость активного сопротивления от частоты. В данной работе приведено качественное описание конструкции кабелей резисторов, имеющих композитную структуру, принцип работы которых основан на эффекте резкого увеличения активного сопротивления с ростом частоты (скин-эффект). Работа содержит теоретическое исследование электрических свойств композитного проводника, состоящего из медной сердцевины и нихромового покрытия. С использованием специализированного пакета для математического моделирования COMSOL Multiphysics 5.2 разработана физико-математическая модель процесса токопрохождения через композитную аксиально-симметричную структуру, имеющую области с высокой (сердцевина) и низкой (оболочка) удельными проводимостями. В работе представлены результаты численного расчета частотной зависимости электрического сопротивления проводников круглого сечения с двухслойной структурой Cu–NiCr. Подобраны оптимальные условия для проведения численного эксперимента с использованием основных электродинамических процессов, описываемых уравнениями Максвелла для квазистационарного электромагнитного поля. Диапазон частот от 100 кГц до 100 МГц был выбран как наиболее интересный с точки зрения практического применения композитной токопроводящей структуры. В статье приводятся данные о влиянии геометрических параметров структуры композитного проводника на частотную зависимость электрического сопротивления и дано распределение плотности пере-

---

\* Статья получена 25 августа 2016.

менного тока по сечению композитного проводника на различных частотах. В процессе моделирования выявлены три характерные области: область быстрого увеличения сопротивления проводника, граничная область, область медленного роста электрического сопротивления. Приводятся пути реализации объекта исследования и возможные сферы использования описываемой структуры.

**Ключевые слова:** скин-эффект, резистивное покрытие, композитный проводник, силовая электроника, электрическая проводимость, помехоподавляющий фильтр, математическое моделирование, частотная зависимость, электродинамика, квазистационарное магнитное поле

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-1-147-158

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие импульсной и высокочастотной силовой электронной техники стимулирует разработку систем и устройств, компоненты которых имеют сильную зависимость активного сопротивления от частоты [1].

Известно явление скин-эффекта – эффекта уменьшения амплитуды электромагнитных волн по мере их проникновения вглубь проводящей среды, проявляющегося в уменьшении проводимости единичного проводника на высоких частотах [2]. Для большинства задач радиотехники явление скин-эффекта нежелательно, однако перспективным является его использование для управляемой модуляции электрического сопротивления на высоких частотах. Перспективным решением в данной области является использование композитных проводников, имеющих покрытие из металлов и сплавов с существенно большим электрическим сопротивлением, с изменяющимися свойствами и структурой проводника [3, 4].

Композитные проводники на основе двух проводящих материалов с различным значением электропроводности и оптимально подобранной геометрией структуры способны выполнять функции помехоподавления и защиты в радиотехнических фильтрах нижних частот (ФНЧ) [5], а также использоваться в качестве конструктивного элемента силовой электроники в устройствах защиты от перенапряжений (УЗИП) [6–10].

В композитной структуре проводника (рис. 1) с ростом частоты вследствие скин-эффекта электрический ток оттесняется из сердцевины с низким удельным электрическим сопротивлением в область покрытия с большим значением электрического сопротивления. При этом с ростом частоты сопротивление композитного проводника будет резко возрастать в области высоких частот, поскольку основная часть тока будет протекать вблизи поверхности композитного проводника через материал с высоким удельным сопротивлением. Для низких частот и постоянного тока электрическое сопротивление проводника будет определяться сопротивлением сердцевины с низким удельным сопротивлением.

В опубликованных работах [3, 4] дано качественное описание конструкции кабелей резисторов, имеющих композитную структуру, принцип работы которых основан на эффекте резкого увеличения активного сопротивления с ростом частоты. Однако количественные данные о влиянии параметров геометрической структуры проводника (толщины слоев) на частотную зависимость активного сопротивления отсутствуют.

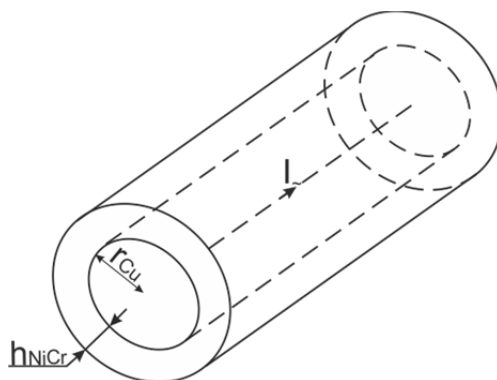


Рис. 1. Геометрия поперечного сечения композитного проводника

Целью данной работы является математическое моделирование прохождения переменного электрического тока через композитную аксиально-симметричную структуру, имеющую области с высокой (сердцевина) и низкой (оболочка) удельными проводимостями, и получение зависимостей электрического сопротивления от частоты при различных параметрах структуры проводника.

## 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Зависимость глубины скин-слоя для однородных проводников круглого сечения определяется [11] по соотношению

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\gamma \mu \omega}}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость,  $\mu$  – магнитная проницаемость вещества проводника,  $\omega$  – круговая частота переменного тока.

Однако данное соотношение нельзя использовать при расчете проводников композитной структуры. Аналитическое решение задачи расчета электрического сопротивления композитного проводника для переменного тока высокой частоты не представляется возможным. Таким образом, необходимо численное решение и разработка соответствующей математической модели.

Объектом исследований в настоящей работе является единственный проводник круглого сечения, состоящий из двух проводящих частей: проводника с низким удельным электрическим сопротивлением (медь (Cu) – 0,01724 Ом·мм<sup>2</sup>/м) и покрытия проводника, состоящего из материала, обладающего более высоким удельным электрическим сопротивлением (сплав никель-хром (NiCr) – 1,4 Ом·мм<sup>2</sup>/м). Выбор материалов обусловлен характеристиками электрической проводимости (разница электрических проводимостей более чем в 100 раз) и стойкости к воздействию высокой температуры, а также возможностью практического применения.

Геометрия расчетной модели проводника и расчетная сетка представлены на рис. 2.

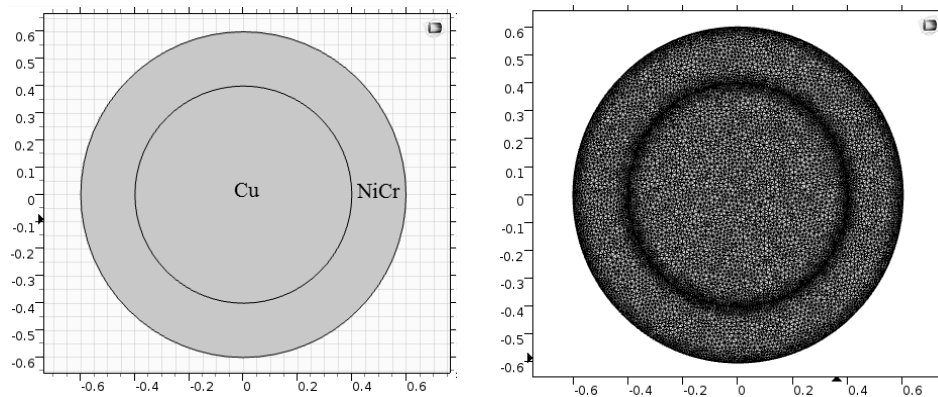


Рис. 2. Изображение геометрии модели композитного проводника и триангуляционной расчетной сетки ( $r_{cond} = 0,4$  мм;  $h_{res} = 0,2$  мм)

Расчет влияния скин-эффекта на электрическое сопротивление на различных частотах осуществлялся методом конечных элементов с использованием специализированного программного обеспечения COMSOL Multiphysics [12, 13]. В расчете учитывались основные электродинамические процессы, характеризующие скин-эффект и описываемые уравнениями Максвелла [14] для квазистационарного электромагнитного поля.

В результате моделирования исследованы:

- распределение плотности электрического тока по сечению композитного проводника;
- частотная зависимость электрического сопротивления композитного проводника.

## 2. УСЛОВИЯ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Условия численного эксперимента выбраны исходя из наиболее интересного диапазона частот от 100 кГц до 100 МГц в соответствии с потенциальными областями практического применения композитной токопроводящей структуры. Расчет токопрохождения сквозь структуру композитного проводника осуществлялся при следующих параметрах численного эксперимента:

- материал проводящей сердцевинки – Cu, удельное электрическое сопротивление  $0,01724 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ;
- материал резистивного покрытия – NiCr, удельное электрическое сопротивление  $1,4 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ;
- длина проводника 1 м;
- радиус проводника 0,6 мм;
- отношение радиуса сердцевинки  $r_{cond}$  к толщине резистивного покрытия  $h_{res}$ : 0,2 – 5;
- частота от 100 кГц до 100 МГц (с шагом изменения 100 кГц).

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате моделирования определено распределение плотности переменного тока по сечению композитного проводника на различных частотах (рис. 3). На низких частотах основной ток протекает в области медной прово-

дящей сердцевины (рис. 3, а, б), а на высоких частотах ток смещается в область проводника с низким значением проводимости (рис. 3, в, г).

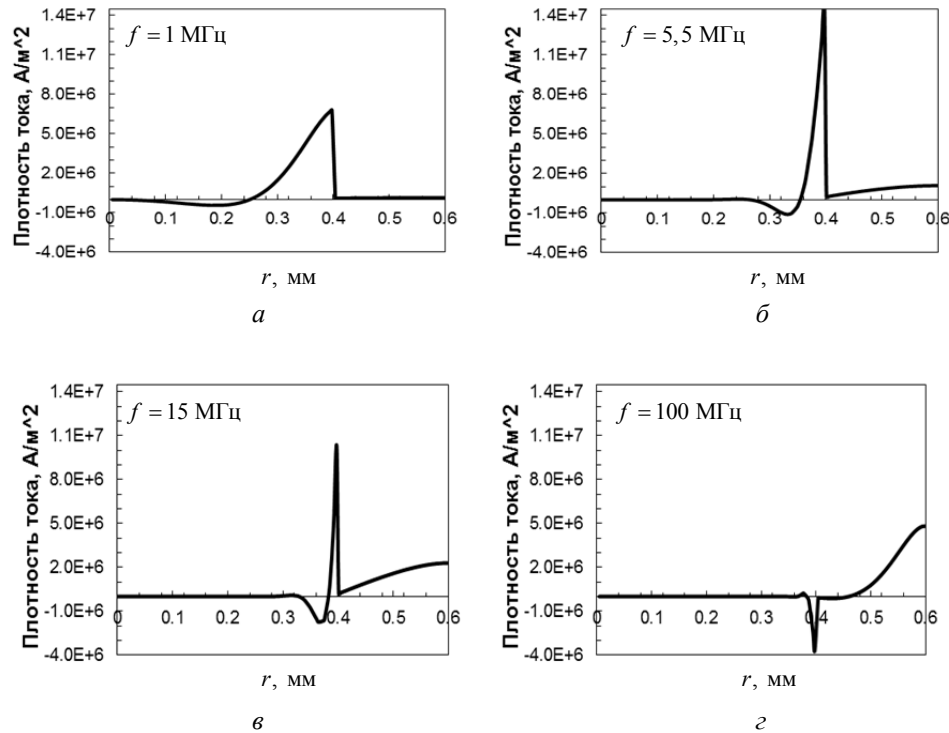


Рис. 3. Распределение плотности переменного тока  $f$  вдоль радиуса  $r$  проводника для различных частот переменного тока

Стоит заметить, что переменный ток может принимать отрицательное значение, которое увеличивается вблизи границы раздела двух сред (Cu–NiCr), но уменьшается толщина слоя, в котором характерно это увеличение. Причиной этого является постоянное изменение вихревого электрического поля  $E$  во времени, созданного магнитным полем с индукцией  $B$ , которое зависит от изменения частоты переменного тока  $I$  [2].

Выделенные точки на рис. 4, а соответствуют частотным распределениям плотности тока (рис. 3), а точка пересечения двух кривых на рис. 4, б соответствует точке «б» на рис. 4, а.

Зависимость электрического сопротивления от частоты (рис. 5) имеет три характерные области [3].

1. *Область быстрого увеличения сопротивления проводника* (до 5,5 МГц). Резкий рост сопротивления обусловлен оттеснением тока к границе раздела двух сред (Cu–NiCr). В данной области ток протекает преимущественно в приповерхностном слое проводящей сердцевины и имеет высокое значение плотности.

2. *Граничная область* (5,5...15 МГц), в которой происходит переход тока из проводящей части композитного проводника в резистивную часть. Частота электрического тока  $f_s$ , при которой происходит резкий перегиб зависимости сопротивления от частоты, можно условно назвать «частотой пере-

хода» [15]. Частота перехода соответствует значению в точке «б» на рис. 4, а и значению в точке пересечения кривых интегральных составляющих тока, протекающих в областях Cu и NiCr на рис. 4, б.

3. Область медленного роста электрического сопротивления (свыше 15 МГц), в которой основная часть электрического тока протекает в области с высоким удельным сопротивлением. Глубина скин-слоя увеличивается за счет меньшего значения проводимости NiCr (соотношение (1)).

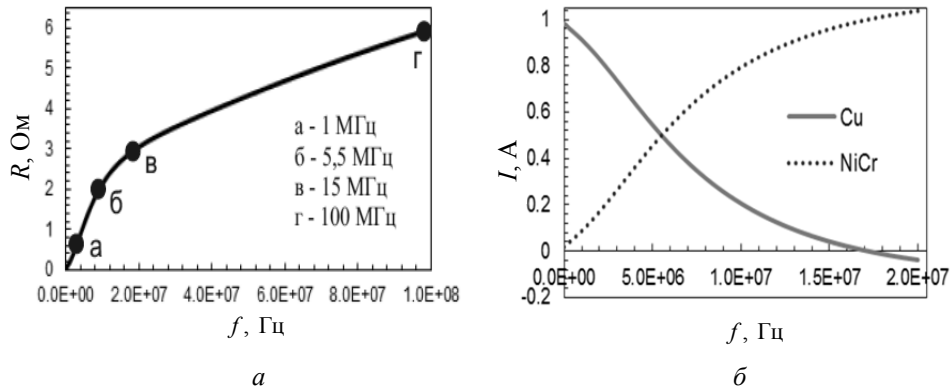


Рис. 4. Зависимость электрического сопротивления (а) и зависимости интегральных составляющих тока, протекающего в областях Cu и NiCr (б) от частоты (радиус проводника  $r_{cond} = 0,4$  мм и толщина покрытия  $h_{res} = 0,2$  мм)

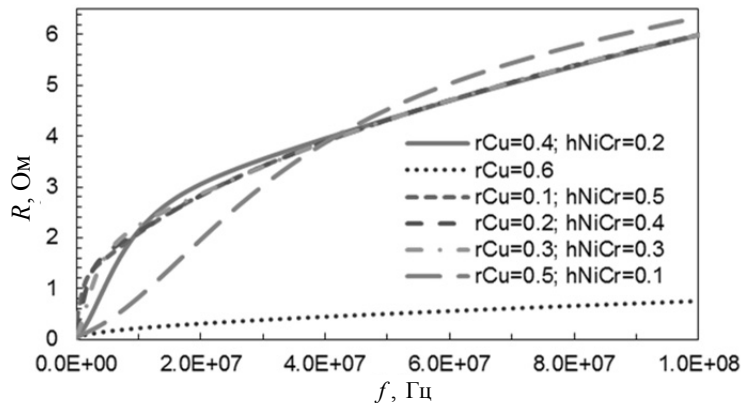


Рис. 5. Зависимости электрического сопротивления проводников от частоты переменного тока при различных отношениях толщины покрытия к радиусу проводника  $r_{cond}/r_{res} = 0,2; 0,5; 1; 2; 5$  при условии постоянства внешнего диаметра 1,2 мм

Расчеты показывают, что с увеличением толщины покрытия и уменьшением радиуса проводящей сердцевины частота перехода уменьшается (рис. 5). Это обусловлено оттеснением тока в область с малой электропроводностью уже при низких частотах. Так, уменьшение отношения радиуса сердцевины  $r_{cond}$  к толщине резистивного покрытия  $h_{res}$  от 5 до 0,2 приводит

к снижению частоты перехода от 24 МГц до 0,45 МГц при условии постоянного диаметра токопроводящей структуры, равного 1,2 мм (рис. 6).

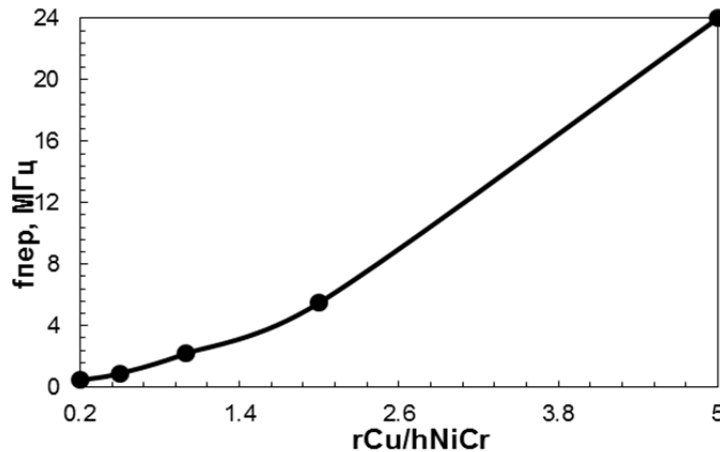


Рис. 6. Зависимость частоты перехода  $f_s$  от отношения радиуса проводника к толщине резистивного покрытия  $r_{cond}/h_{res} = 0,2; 0,5; 1; 2; 5$  при условии постоянства внешнего диаметра 1,2 мм

Стоит заметить, что сопротивление проводников с различным отношением толщин существенно различается в области малых частот (около частоты перехода  $f_s$ ) и постепенно становится практически одинаковым в области больших частот (4–5 частот  $f_s$ ). Это обусловлено полным вытеснением тока в область покрытия с высоким сопротивлением.

Сравнение зависимостей сопротивления проводников без покрытия и с различными толщинами резистивного покрытия (0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 мм) при условии одинакового диаметра проводящей части (рис. 7) показывает:

- на высоких частотах (10...20 МГц и более) электрическое сопротивление проводника с резистивным покрытием в 4–8 раз выше сопротивления проводника того же диаметра, но без покрытия;
- с увеличением толщины покрытия сопротивление на высоких частотах (10 МГц и более) уменьшается по сравнению с проводником, имеющим покрытие меньшей толщины;
- с увеличением толщины покрытия наблюдается значительный рост сопротивления в области низких частот (меньших частот перегиба) и уменьшение частоты перехода;
- постоянный и переменный ток в области низких частот (до 30 кГц) имеет одинаковое сопротивление, которое не зависит от толщины резистивного покрытия.

При увеличении или уменьшении объема материала с высоким значением электропроводности (рис. 8) основное изменение наблюдается в области средних частот. С уменьшением радиуса проводящей сердцевины смещающийся ток быстрее оказывается возле границы раздела двух сред, т. е. увеличение сопротивления начинается на более низких частотах по сравнению с проводником большего радиуса. Частота перехода при этом практически не изменяется, изменяется лишь значение сопротивления в области частоты перехода.

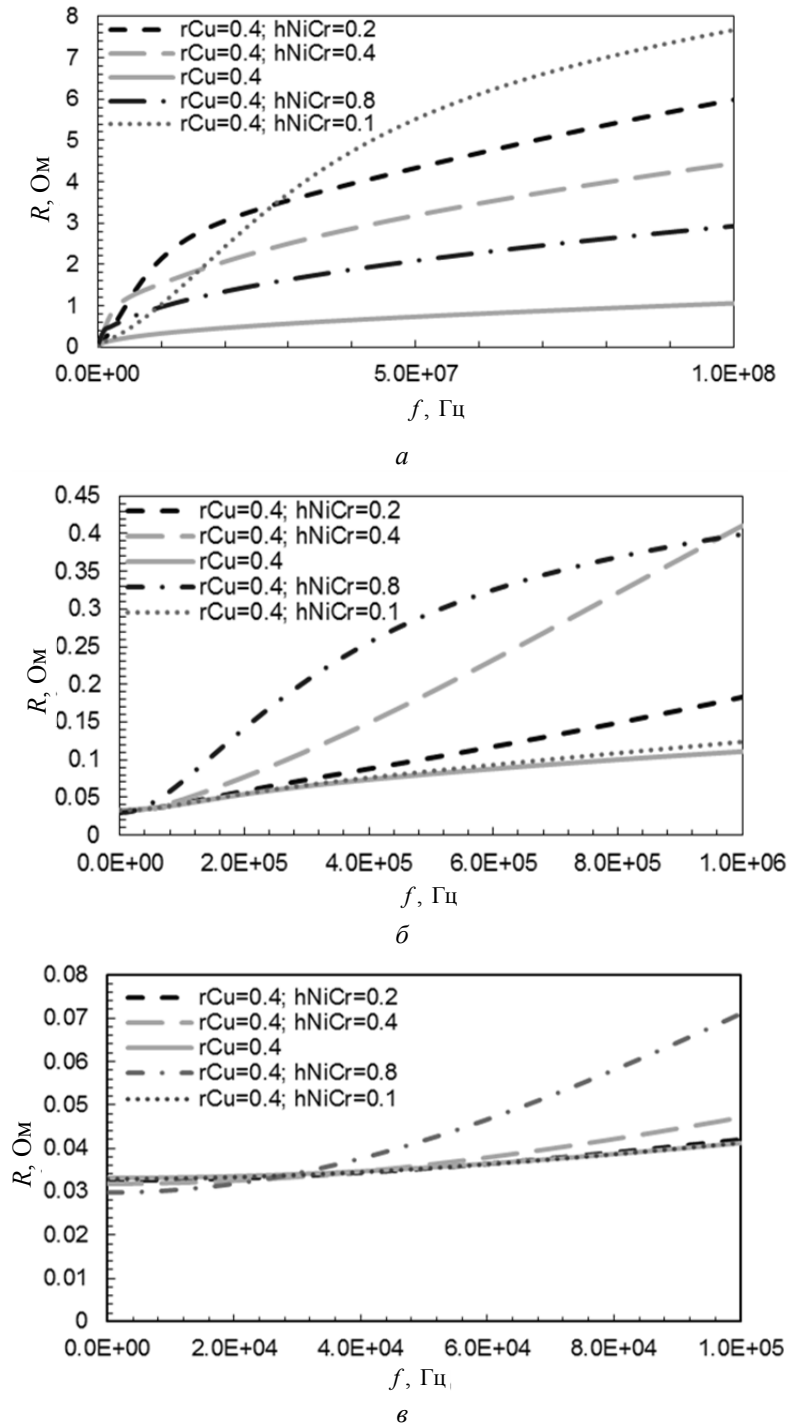


Рис. 7. Частотная зависимость сопротивления композитного проводника при различных толщинах резистивного покрытия  $r_{res} = 0,1; 0,2; 0,4; 0,8$  мм и постоянном радиусе проводника  $r_{cond} = 0,4$  мм при частотах:

$a - 100$  МГц;  $б - 1$  МГц;  $в - 100$  кГц



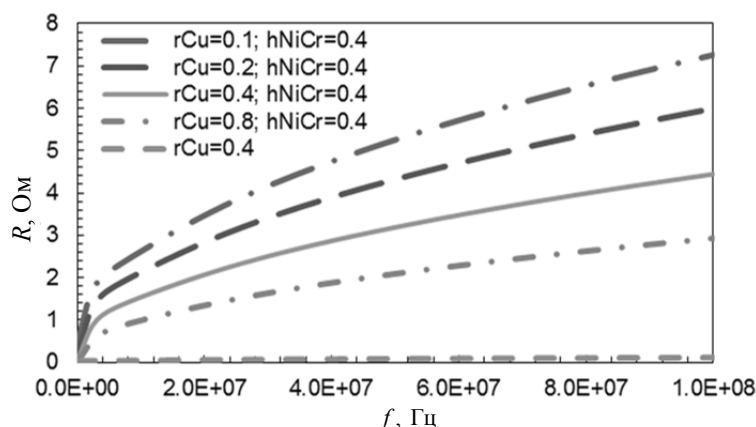


Рис. 8. Частотная зависимость сопротивления композитного проводника при различных радиусах проводящей сердцевины  $r_{cond} = 0,1; 0,2; 0,4; 0,8$  мм и постоянной толщине резистивного покрытия  $r_{res} = 0,4$  мм

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено теоретическое исследование электрических свойств композитного проводника, состоящего из медной сердцевины и нихромового покрытия. Разработана физико-математическая модель процесса токопрохождения через композитную структуру, имеющую области с высокой и низкой удельной проводимостью. Построены зависимости электрического сопротивления от частоты для различных параметров геометрии токопроводящей двухслойной структуры Cu–NiCr. В процессе численного моделирования было выявлено следующее:

- композитный проводник круглого сечения с резистивным слоем нихрома (Cu+NiCr) имеет в 5–8 раз большее сопротивление на средних и высоких частотах (от 1 МГц до 100 МГц), чем у медного проводника (Cu) с аналогичными параметрами;
- на низких частотах однородный и композитный проводники имеют аналогичные свойства, поскольку постоянный и переменный низкочастотные (до 100 кГц) токи протекают преимущественно в объеме проводящей сердцевины;
- частотная зависимость сопротивления композитной структуры имеет три характерные области: область быстрого увеличения сопротивления проводника, обусловленную оттеснением тока к границе раздела двух сред (Cu–NiCr); граничную область, которая соответствует переходу основной части тока из области Cu в область NiCr; область медленного роста электрического сопротивления, соответствующую протеканию тока в области высокого удельного сопротивления;
- значение частоты перехода соответствующей граничной области определяется в основном толщиной резистивного покрытия и смещается в большую или меньшую сторону в зависимости от параметров токопроводящей структуры проводников.

Полученные данные могут быть использованы при разработке силовых помехоподавляющих фильтров и устройств защиты от перенапряжений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов А.А. Макроскопическая электродинамика. – 2-е изд. – М.: Наука, 2005.
2. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. – М.: Высшая школа, 1983. – 463 с.
3. Patent US 4301428. Radio frequency interference suppressor cable having resistive conductor and lossy magnetic absorbing material / F. Mayer. – N US 06/079,197; appl. date 26.09.1979; publ. date 17.11.1981.
4. Patent US 4079192. Conductor for reducing leakage at high frequencies / B. Josse. – N 05/478,602; appl. date 12.06.1974; publ. date 14.03.1978.
5. Patent US 4510468. RF Absorptive line with controlled low pass cut-off frequency / F. Mayer. – N 06/429,032; appl. date 30.09.1982; publ. date 09.04.1985.
6. Patent US 4383225. Cables with high immunity to electro-magnetic pulses (EMP) / F. Mayer. – N 06/166,403; appl. date 07.07.1980; publ. date 10.05.1983.
7. Patent US 7671278. Cable having EMI-suppressing arrangement and method for making the same / J.-G. Fong, H.-F. Lee, K.-F. Chen. – N 11/981,287; appl. date 31.10.2007; publ. date 02.03.2010.
8. Patent US 5883565. Frequency dependent resistive element / J.P. Furino. – N 08/941,7044; appl. date 01.10.1997; publ. date 16.03.1999.
9. Патент 2284622 Российская Федерация. Устройство для защиты от перенапряжений / Б.В. Ефимов, А.Н. Данилин, В.В. Колобов. – № 2005105918/09; заявл. 02.03.2005; опубл. 27.09.2006.
10. Патент 132633 Российская Федерация. Устройство для подавления высокочастотных перенапряжений / С.М. Коробейников, Н.Я. Илюшов, Ю.А. Лавров, В.В. Лопатин, В.П. Брыкин, А.Ю. Коробенкова. – № 2013120271/07; заявл. 30.04.2013; опубл. 20.09.2013.
11. *Vizmuller P.* RF design guide: systems, circuits, and equations. – Boston, MA: Artech House, 1995. – P. 81–84.
12. Исследование информативности емкостей многослойных диэлектрических структур / А.Е. Чижиков, А.А. Лапшин, Д.В. Суворов, А.А. Зеленкевич, Г.П. Гололобов, А.А. Сережин, А.И. Мороз // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2015. – № 53. – С. 144–148.
13. *Овчинникова Е.В., Фаткин В.А.* Особенности моделирования процесса получения диэлектрических покрытий // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2008. – № 25. – С. 71–76.
14. *Бакулин А.И.* Об ортогональности составляющих электромагнитного поля // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2009. – № 27. – С. 75–79.
15. *Lam H.Y.-F.* Analog and digital filters: design and realization. – Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979. – 632 p.

*Буванов Сергей Юрьевич*, аспирант кафедры промышленной электроники Рязанского государственного радиотехнического университета. Основное направление научных исследований – физика и технология тонких пленок. E-mail: lilbuv@mail.ru

*Суворов Дмитрий Владимирович*, кандидат технических наук, доцент, начальник Управления организации научных исследований Рязанского государственного радиотехнического университета. Основное направление научных исследований – физика и технология тонких пленок. Имеет более 60 публикаций. E-mail: dmitriy\_suvo-rov@mail.ru

*Гололобов Геннадий Петрович*, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры промышленной электроники Рязанского государственного радиотехнического университета. Основное направление научных исследований – физика и технология тонких пленок. Имеет более 60 публикаций. E-mail: gololobov.genpady@yandex.ru

*Тарабрин Дмитрий Юрьевич*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры промышленной электроники Рязанского государственного радиотехнического университета. Основное направление научных исследований – физика и технология тонких пленок. Имеет более 40 публикаций. E-mail: tarabrin dmitriy@ gmail.com

*Сливкин Евгений Владимирович*, ведущий инженер Управления организации научных исследований Рязанского государственного радиотехнического университета. Основное направление научных исследований – физика и технология тонких пленок. Имеет более 50 публикаций. E-mail: e.slivkin@mail.ru

***Study of frequency dependence of composite conductor electrical resistance\****

*S.Yu. BUVAKOV<sup>1</sup>, D.V. SUVOROV<sup>2</sup>, G.P. GOLOBOV<sup>3</sup>, D.Yu. TARABRIN<sup>4</sup>,  
E.V. SLIVKIN<sup>5</sup>*

<sup>1</sup> Ryazan State Radio Engineering University, 59/1 Gagarina St., 390005, Russian Federation, post graduate student. E-mail: lilbuv@mail.ru

<sup>2</sup> Ryazan State Radio Engineering University, 59/1 Gagarina St., 390005, Russian Federation, PhD. E-mail: dmitriy\_suvorov@mail.ru

<sup>3</sup> Ryazan State Radio Engineering University, 59/1 Gagarina St., 390005, Russian Federation, PhD. E-mail: golobov.gennady@yandex.ru

<sup>4</sup> Ryazan State Radio Engineering University, 59/1 Gagarina St., 390005, Russian Federation, PhD. E-mail: tarabrin dmitriy@gmail.com

<sup>5</sup> Ryazan State Radio Engineering University, 59/1 Gagarina St., 390005, Russian Federation, lead engineer. E-mail: e.slivkin@mail.ru

At present, under conditions of rapid development of pulse technology and high-frequency power electronics, an urgent task is to study systems and devices that have a strong dependence of their active resistance on frequency. In this paper, we give a qualitative description of the construction of resistor cables having a composite structure, the operation principle of which is based on the effect of a sharp increase in the resistance with increasing frequency (skin effect). The work contains a theoretical study of electrical properties of a composite conductor consisting of a copper core and a nichrome coating. Using a specialized package for mathematical modeling COMSOL Multiphysics 5.2, a physical-mathematical model of the current-carrying process through a composite axially symmetric structure having regions with high (core) and low (shell) conductivities has been developed. The paper presents the results of a numerical calculation of the frequency dependence of the electrical resistance of circular conductors with a two-layer Cu-NiCr structure. Optimal conditions for carrying out a numerical experiment using the basic electrodynamic processes described by the Maxwell equations for a quasi-stationary electromagnetic field were chosen. The frequency range from 100 kHz to 100 MHz was chosen as the most prospective in terms of practical application of the composite conductive structure. The article presents data on the influence of the geometric parameters of the structure of a composite conductor on the frequency dependence of electrical resistance and gives the distribution of the alternating current density over the section of the composite conductor at various frequencies. In the modeling process, three characteristic areas were identified: the region of a rapid increase in the conductor resistance, the boundary region, and the region of a slow growth of electrical resistance. In conclusion, the ways of realization of the object of research and possible application areas of the described structure are given.

**Keywords:** skin effect, resistive coating, composite conductor, power electronics, electrical conductivity, noise suppression filter, mathematical modeling, frequency dependence, electrodynamics, quasi-stationary magnetic field

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-1-147-158

**REFERENCES**

1. Vlasov A.A. *Makroskopicheskaya elektrodinamika* [Macroscopic electrodynamics]. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 2005.
2. Matveev A.N. *Elektrichestvo i magnetizm* [Electricity and magnetism]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 463 p.
3. Mayer F. *Radio frequency interference suppressor cable having resistive conductor and lossy magnetic absorbing material*. Patent US, no. 4301428, 1981.
4. Josse B. *Conductor for reducing leakage at high frequencies*. Patent US, no. 4079192, 1978.

---

\* Received 25 August 2016.

5. Mayer F. *RF Absorptive line with controlled low pass cut-off frequency*. Patent US, no. 4510468, 1985.
6. Mayer F. *Cables with high immunity to electro-magnetic pulses (EMP)*. Patent US, no. 4383225, 1983.
7. Fong J.-G., Lee H.-F., Chen K.-F. *Cable having EMI-suppressing arrangement and method for making the same*. Patent US, no. 7671278, 2010.
8. Furino J.P. *Frequency dependent resistive element*. Patent US, no. 5883565, 1999.
9. Efimov B.V., Danilin A.N., Kolobov V.V. *Ustroistvo dlya zashchity ot perenapryazhenii* [Surge protective device]. Patent RF, no. 2284622, 2006.
10. Korobeinikov S.M., Ilyushov N.Ya., Lavrov Yu.A., Lopatin V.V., Brykin V.P., Korobenkova A.Yu. *Ustroistvo dlya podavleniya vysokochastotnykh perenapryazhenii* [Device for suppressing high-frequency overvoltages]. Patent RF, no. 132633, 2013.
11. Viztmuller P. *RF design guide: systems, circuits, and equations*. Boston, MA, Artech House, 1995, pp. 81–84.
12. Chizhikov A.E., Lapshin A.A., Suvorov D.V., Zelenkevich A.A., Gololobov G.P., Se-rezhin A.A., Moroz A.I. *Issledovanie informativnosti emkosti mnogosloinykh dielektricheskikh struktur* [Research of containers multilayer dielectric structure information]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2015, no. 53, pp. 144–148.
13. Ovchinnikova E.V., Fatkin V.A. *Osobennosti modelirovaniya protsessa polucheniya dielektricheskikh pokrytii* [Features of building models of the process for obtaining dielectric coatings]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2008, no. 25, pp. 71–76.
14. Bakulin A.I. *Ob ortogonal'nosti sostavlyayushchikh elektromagnitnogo polya* [On the orthogonality of the components of the electromagnetic field]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2009, no. 27, pp. 75–79.
15. Lam H.Y.-F. *Analog and digital filters: design and realization*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1979. 632 p.