

---

УДК 621.374:004.942(045)

**В.Т. Чемерис**, канд. техн. наук, **И.А. Бородий**,  
**А.Е. Маринченко**, канд. техн. наук  
Национальный авиационный университет Украины  
(Украина, 03680, Киев, просп. Космонавта Комарова, 1,  
тел. (044) 4067840, e-mail: vchemer@voliacable.com)

## **Моделирование прохождения импульсного электрического тока через контактные поверхности с многослойной электропроводностью**

Рассмотрены особенности прохождения импульсного электрического тока через граничные поверхности электродов скользящего контакта, имеющие слоистый характер электропроводности. Выполнено математическое моделирование переходного процесса включения тока через контактную пару. Выявлена возможность улучшения распределения плотности тока по контактной поверхности при определенных законах распределения электропроводности по слоям. Показано, что снижение проводимости поверхностных слоев позволяет избежать чрезмерной концентрации плотности тока на сбегающем краю подвижного электрода при высокой скорости относительного перемещения электродов.

Розглянуто особливості проходження імпульсного електричного струму через граничні поверхні електродів ковзаючого контакту, що мають шаруватий характер електропровідності. Здійснено математичне моделювання перехідного процесу включення струму через контактну пару. Виявлено можливість покращення розподілу густини струму вздовж контактної поверхні при певних законах розподілу електропровідності по шарах. Показано, що зниження провідності поверхневих шарів дозволяє уникнути надмірної концентрації густини струму на збігаючому краю рухомого електроду при високій швидкості відносного руху електродів.

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* скользящий электрический контакт, переходный процесс, включение импульсного тока, многослойная электропроводность.

При создании электромеханических преобразователей энергии, работающих в импульсных режимах, возникает необходимость предварительного анализа работы контактных узлов, особенно в случае, если контакт является скользящим. Такие узлы применяются в силовых элементах автоматики, приводах линейного перемещения, ускорителях макротел. Импульсные токи в таких устройствах могут достигать значительной величины, измеряемой десятками или сотнями килоампер и более.

Предварительные теоретические исследования позволили установить взаимосвязь между распределением тока по контактной поверхности и

© В.Т. Чемерис, И.А. Бородий, А.Е. Маринченко, 2014

отношением коэффициентов диффузии электромагнитного поля в электроды контактной пары, с одной стороны, и скоростью относительного перемещения электродов, с другой. Установлены следующие особенности подвижного контактного соединения:

1) неравномерное распределение плотности тока по контактной поверхности связано с конфигурацией токопровода, подводящего ток к контактной паре;

2) в подвижном контакте наблюдается концентрация тока под сбегающим краем подвижного электрода, тем более значительная, чем выше скорость относительного движения электродов.

В общем случае переход тока значительной величины из одного электрода контактной пары в другой характеризуется комплексом физических процессов, среди которых важнейшими являются многоточечный характер контакта, локальный разогрев отдельных точек контакта, возникновение микроскопических дуговых разрядов с соответствующим выделением тепловой и лучистой энергии в контактной зоне. На переход тока из одного электрода в другой влияет также электрохимическая активность металла каждого электрода.

Однако в случае скользящего контакта при больших токах наиболее существенным становится влияние собственного магнитного поля. Оно в наибольшей мере определяет особенности распределения плотности тока по контактной поверхности. С увеличением скорости относительного движения электродов следует также учитывать особенности коммутационного процесса, обусловленные изменением магнитного потокосцепления контактной пары вследствие изменения конфигурации электрического контура при перемещении подвижного электрода.

Рассмотрение всей совокупности процессов, характеризующих работу скользящего контакта при больших токах, привело к выводу о необходимости детального изучения электродинамических особенностей такого контакта, поскольку именно они создают тот фон, на котором происходят другие локализованные контактные процессы.

Принципиально важным оказалось изучение влияния характеристик относительного движения электродов на распределение плотности тока в контактной зоне. Методика математического моделирования уравнения магнитной индукции в зоне скользящего контакта стала основой для вычисления распределения плотности тока. Возникла проблема поиска способов улучшения распределения плотности тока, чтобы избежать перегрева отдельных зон контакта, поскольку такой перегрев может стать причиной локального оплавления материала электродов.

**Постановка задачи.** Одним из методов улучшения распределения тока по поверхности скользящего контакта является варьирование коэффициентов диффузии магнитного поля для подвижного и неподвижного электродов. Установлено [1], что при снижении поверхностной электропроводности электродов уменьшается вероятность возникновения микродуговых разрядов под сбегаящим краем подвижного электрода. Уменьшать электрическую проводимость по всей массе электрода нецелесообразно, так как это приводит к нежелательному увеличению джоулевых потерь энергии в электродах. Поэтому была рассмотрена такая структура электродов, в которой поверхностный слой имеет относительно невысокую электропроводность, а основное тело электрода изготовлено из материала с высокой проводимостью (на основе меди). Кроме того, имеется определенная переходная зона, в которой электропроводность изменяется от минимальной величины на контактной поверхности до максимальной величины на некотором расстоянии от поверхности. В рамках численной модели эта переходная зона изображалась в виде многослойной структуры, в которой электропроводность изменяется от слоя к слою по определенному закону.

При математическом моделировании поставлена задача рассмотреть несколько схем распределения электропроводности в таких многослойных структурах, найти главные критерии, определяющие характер электродинамических процессов, и изучить влияние скорости движения на распределение магнитного поля и плотности тока в контактных электродах при условии, что контактные поверхности имеют многослойную электропроводность, заданную по определенному закону.

**Схемы распределения электропроводности.** Аналитическое исследование прохождения импульсного тока через проводники различной конфигурации со слоисто-неоднородной электропроводностью связано со значительными трудностями [2]. В то же время, методы математического моделирования позволяют находить решения уравнений электромагнитного поля в достаточно сложных конфигурациях. При анализе быстро протекающих процессов в уравнении магнитной индукции могут быть учтены как диффузионные, так и волновые процессы, а также механическое перемещение некоторых элементов расчетной модели. Такое уравнение для каждого блока модели может быть записано в общем виде:

$$\Delta \mathbf{H} = \frac{\partial}{\partial t} (\mu \sigma \mathbf{H}) + \text{rot} ((\mu \sigma) \mathbf{V} \times \mathbf{H}) + \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\mu \epsilon \mathbf{H}),$$

где  $\mu$  и  $\sigma$  — локальные значения коэффициентов магнитной проницаемости и электропроводности среды;  $V$  — скорость движения среды. Если ввес-

ти нормированное время  $\tilde{t} = t/T$ , используя для этого базовый интервал времени  $T$ , равный длительности импульса поля, а в качестве базовой скорости принять величину  $V_0 = X/T$ , где  $X$  — характерный размер модели, и предположить, что параметры  $\mu$  и  $\sigma$  неизменны в пределах отдельных зон модели, то уравнение индукции в нормированных переменных будет содержать два критерия подобия:  $Re_M$ , представляющий собой магнитное число Рейнольдса,  $Re_M = \mu\sigma V_0 X$ , и  $K_W$ , определяющий относительное влияние волновых процессов на распределение поля в элементах расчетной модели. Тогда запишем

$$\tilde{\Delta}\mathbf{H} = Re_M \left[ \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \tilde{t}} + \text{rot}(\tilde{\mathbf{U}} \times \mathbf{H}) \right] + K_W \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial \tilde{t}^2}. \quad (1)$$

Здесь  $U = V/V_0$ ;  $\tilde{\Delta}$  — оператор Лапласа в нормированных координатах ( $\tilde{x} = x/X$ ,  $\tilde{y} = y/X$ ,  $\tilde{z} = z/X$ );  $K_W = V_0^2/v^2$ , где  $v = (\mu\epsilon)^{-1/2}$  — локальная скорость электромагнитных волн в данном блоке или слое модели.

В работе [3] показано, что на основании уравнения (1) влиянием волновых процессов можно пренебречь, если между основными критериями подобия  $Re_M$  и  $K_W$  существует соотношение  $\beta = K_W/Re_M = \epsilon/\sigma T \leq 0,1$ . При изучении импульсных процессов длительностью порядка 1 мс рассматривалась среда с металлической электропроводностью и размерами исследуемых образцов от 0,1 до 1,0 м, в которой условие  $\beta \leq 0,1$  выполнимо. Поэтому математическое моделирование процесса осуществлялось на основе уравнения диффузии магнитного поля в нормированной форме:

$$\frac{D}{V_0} \tilde{\Delta} H_z = X_0 \left( \frac{\partial H_z}{\partial \tilde{t}} - \frac{V_x}{V_0} \frac{\partial H_z}{\partial \tilde{x}} \right), \quad (2)$$

где  $D = (\mu\sigma)^{-1}$  — коэффициент диффузии магнитного поля.

Для двумерного процесса распределения поля  $H_z$  в плоскости  $x, y$ , когда подвижный электрод имеет возможность перемещаться только вдоль оси  $x$ , это уравнение принимает вид

$$\tilde{\Delta} H_z = Re_M \left( \frac{\partial H_z}{\partial \tilde{t}} - v_r \frac{\partial H_z}{\partial \tilde{x}} \right), \quad (3)$$

где  $v_r = V_x/V_0$ . В соответствии с уравнениями (2), (3) можно утверждать, что в качестве условий подобия распределения поля в двух моделях, имеющих различные пространственные или временные масштабы, могут быть приняты следующие условия:  $Re_M = \text{const}$ ,  $v_r = V_x/V_0 = \text{const}$ . Иными словами, с помощью магнитного числа Рейнольдса можно определять

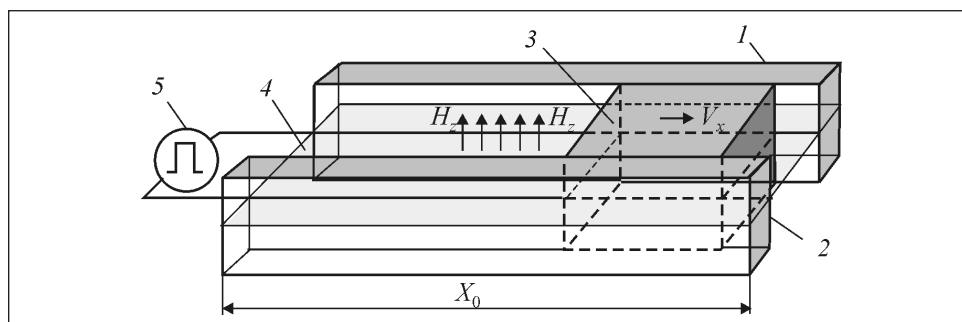


Рис. 1. Типичная схема импульсного электромеханического преобразователя энергии со скользящим контактом: 1, 2 — неподвижные электроды; 3 — якорь; 4 — плоскость решения задачи; 5 — источник импульсного тока

подобие электромагнитных процессов в контактной паре скользящего контакта только в совокупности с относительной скоростью движения рассматриваемого электрода  $v_r$ .

Устройство, в котором используется скользящий контакт (рис. 1), — это система для перемещения подвижного электрода (якоря) при подаче импульсного тока от источника через неподвижные электроды 1, 2. Задача о распределении поля и тока в такой системе является трехмерной, однако существует центральная плоскость симметрии, в которой задача может быть сведена к двумерной даже в случае проявления эффекта Холла на контактных поверхностях.

Уравнение (3) смоделировано как двумерная задача в среде программных пакетов FlexPDE-6 и Comsol версии 3.5. На рис. 2 показана схема модели, на которой представлены электропроводные блоки 1 — 3, а вектор  $V_x$  указывает направление скорости движения подвижного электрода. Вблизи контактной поверхности каждый из этих блоков может иметь слоистую электропроводность, как показано на рис. 3.

Предполагалось, что расчетная модель (см. рис. 2) — симметрична относительно горизонтальной оси (на практике эта симметрия не всегда выполняется из-за возможного различия контактных процессов на верхней и нижней контактных поверхностях подвижного электрода). Электрические токи, протекающие в импульсном режиме по этим электродам, считались индуцированными в результате мгновенного включения магнитного поля с пиковым значением индукции  $B_0$  во внутренней области пространства, ограниченной поверхностями электродов по линии  $abcd$ . С учетом предположения о симметрии модели относительно оси  $x$  картина поля анализировалась только в верхней половине модели (выделена на рис. 2 серым цветом).

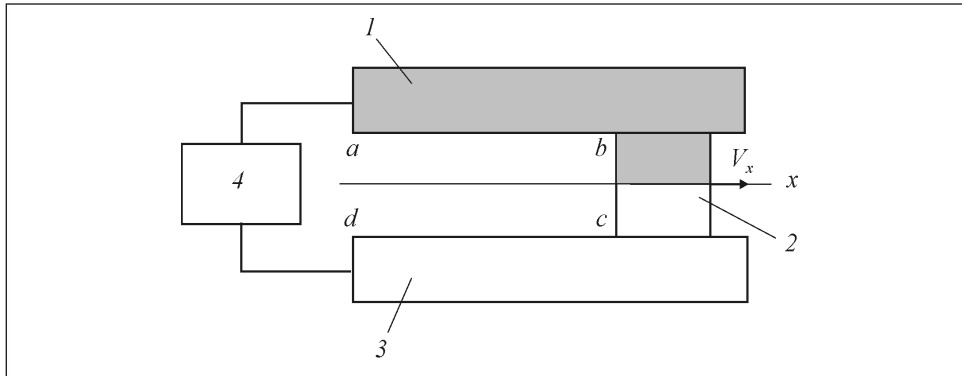


Рис. 2. Расчетная схема для моделирования прохождения импульсного тока через скользящий контакт: 1, 3 — неподвижные электроды; 2 — подвижный электрод; 4 — источник импульсного тока

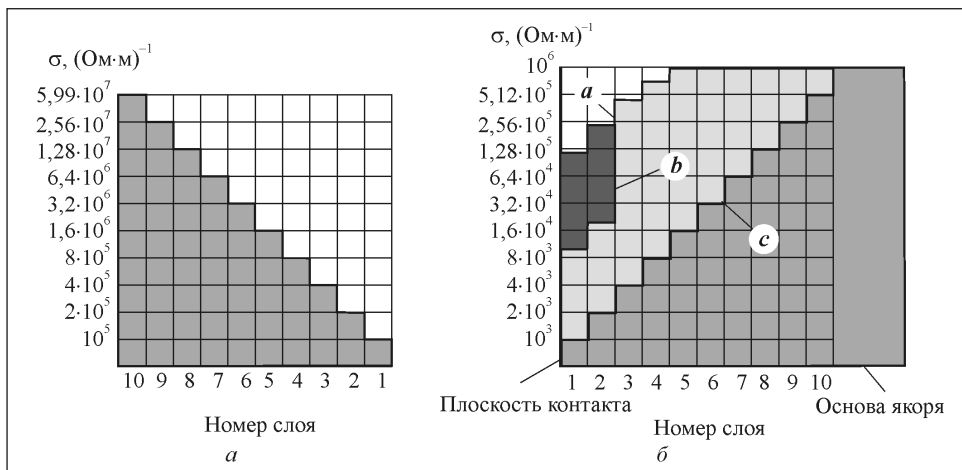


Рис. 3. Заданное распределение электрической проводимости в поверхностных слоях неподвижных электродов (а) и на контактных поверхностях подвижного электрода (б)

Для определения влияния скорости относительного движения электродов контактная пара была исследована при одинаковой и однородной по объему электропроводности электродов, равной  $6 \cdot 10^6 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ . Результаты моделирования представлены на рис. 4 для трех случаев при идеальном контакте по всей поверхности. Линии равных значений магнитной индукции  $B = \mu_0 H$  проведены через равные интервалы  $\Delta B$  для момента времени, соответствующего окончанию длительности импульса поля  $B_0$  (т.е.  $\tilde{t} = 1$ ). Разница между значениями индукции соседних линий  $\Delta B = \text{const}$  представляет собой величину так называемой трубки тока, так как в соот-

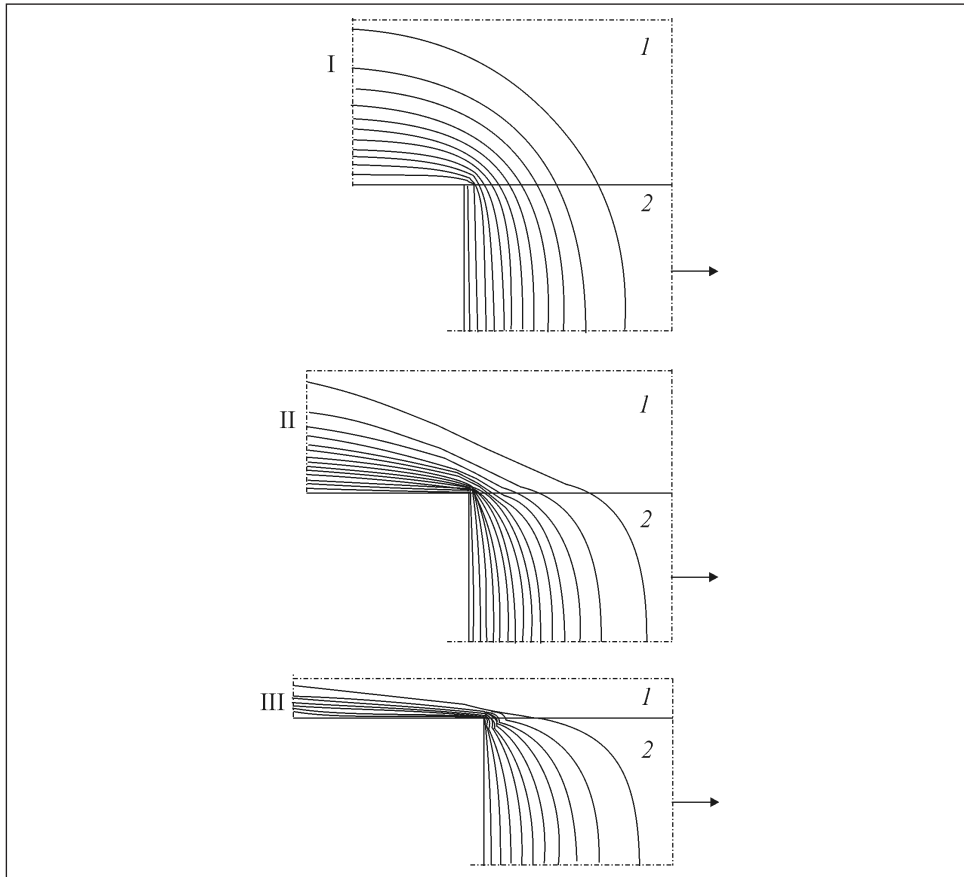


Рис. 4. Линии уровня магнитной индукции в электродах скользящего контакта при различных значениях скорости относительного движения электродов: I —  $V = 10$  м/с; II —  $V = 100$  м/с; III —  $V = 1000$  м/с; 1 — неподвижный электрод; 2 — подвижный электрод (якорь)

ветствии с законом полного тока элемент тока при плоско-параллельном магнитном поле можно записать в виде  $\Delta I = jh \Delta l = \Delta B h / \mu$ , где  $j$  — плотность тока;  $h = \text{const}$  — толщина токового слоя, измеренная вдоль силовой линии магнитной индукции.

Выражение для тока на единицу высоты токового слоя имеет вид  $\Delta I / h = j \Delta l = \Delta B / \mu$ , а для линейной плотности тока в проводнике — следующий вид:  $j = jh = \Delta I / \Delta l = (1/\mu) \Delta B / \Delta l$ . Следовательно, линейная плотность тока тем больше, чем меньше в плоскости рис. 4 расстояние  $\Delta l$  между линиями равных значений индукции, измеренное по кратчайшему пути. Программа Comsol реализует алгоритм вычисления плотности тока. Как видно из рис. 4, при сравнительно малой скорости относительного дви-

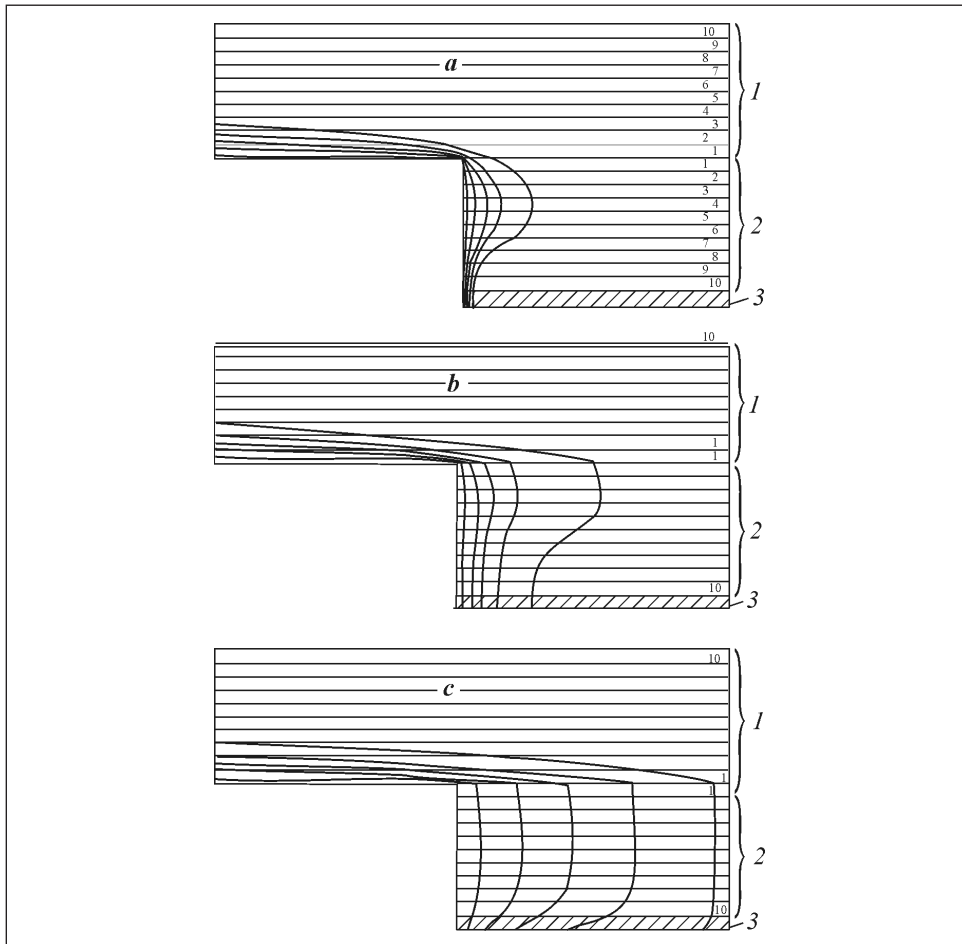


Рис. 5. Линии уровня магнитной индукции в контактной зоне скользящего контакта при различных законах задания электропроводности в слоях контактной поверхности подвижного электрода при  $V = 2500$  м/с: 1 — неподвижный электрод; 2 — подвижный электрод (якорь); 3 — центральный массив якоря; *a, б, c* — варианты изменения электропроводности (см. рис. 3, б)

жения электродов (случай I) за время длительности импульса магнитное поле (и, соответственно, ток) успевает заполнить почти все поперечное сечение каждого из электродов. При увеличении скорости движения (случаи II и III) магнитное поле и ток концентрируются вблизи угловой точки контакта. В случае III плотность тока может достигать значений, грозящих локальным оплавлением материала электрода.

Поиск способов предотвращения концентрации тока вблизи угловой точки контакта реализован математическим моделированием скользящего



контакта при многослойной электропроводности контактных поверхностей (см. рис. 3). Для неподвижных электродов было выбрано распределение электропроводности в поверхностных слоях контакта в соответствии с графиком, представленным на рис. 3, *a*. Для контактных поверхностей подвижного электрода приняты три различных варианта, *a*, *b*, *c*, изменения электропроводности от слоя к слою, указанные на рис. 3, *б*. Слой *a* находится непосредственно на контактной поверхности и может рассматриваться как эквивалент переходного сопротивления между подвижным и неподвижным электродами. Толщина каждого слоя принята равной 1 мм. Результаты моделирования переходного процесса включения импульсного тока при относительной скорости перемещения электродов 2,5 км/с схематически представлены на рис. 5.

Поверхностный слой неподвижного электрода имеет электропроводность  $10^5 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ , что приблизительно в 500 раз меньше электропроводности меди. Однако распределение магнитного поля и тока вдоль контактной границы в основном зависит от величины электропроводности поверхностных слоев подвижного электрода (якоря). Если электропроводность слоев якоря соответствует варианту *a* (см. рис. 3, *б*), где поверхностный слой также имеет электропроводность  $10^5 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ , то диффузия поля и тока за время длительности импульса успевает произойти на сравнительно небольшую глубину вдоль контактной границы. При снижении электропроводности на поверхности подвижного электрода до  $10^4 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$  (вариант *b* на рис. 3, *б*) диффузия поля и тока за время длительности импульса происходит на значительно большую глубину вдоль контактной границы. И наконец, если распределение электропроводности по слоям подвижного электрода соответствует варианту *c* (см. рис. 3, *б*), где поверхностный слой имеет электропроводность  $10^3 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ , то диффузия поля и тока за время длительности импульса успевает распространиться практически на всю длину границы контакта, вследствие чего значительно снижается концентрация плотности тока на участках, близких к угловой точке контакта. Это свидетельствует о возможности выравнивания распределения тока по контактной поверхности при больших значениях скорости относительного движения электродов, что актуально для быстродействующих импульсных устройств.

## Выводы

Математическое моделирование картины поля и токов на границе скользящего контакта подтверждает закономерность концентрации плотности тока в угловой точке контакта. Установлено, что снижение электропро-

водности в поверхностных слоях электродов позволяет распределить ток вдоль большей длины в пределах контактной зоны. Установлено также, что снижение электропроводности на контактных поверхностях подвижного электрода дает больший эффект, чем снижение электропроводности на поверхности неподвижных электродов. При этом соотношение значений электропроводности неподвижного и подвижного электродов должно быть не меньше десяти, а материал основной массы электродов за пределами многослойной приграничной зоны должен иметь высокую электропроводность, чтобы избежать излишних джоулевых потерь энергии в токопроводах, с помощью которых осуществляется подвод импульсного тока к контактной зоне.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chemerys V.T.* Key problems of railgun: new concept for their resolution // *Procedia Engineering*. — 2013. — Vol. 58. — P. 377—383. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).
2. *Козловский В.В., Бычковский Р.А., Свечников Г.С., Згурский А.В.* Синтез неоднородных электромагнитных сред. — Киев: Наук. думка, 1992. — 268 с.
3. *Чемерис В.Т., Бородий И.А.* Моделирование волновых процессов в мелкошихтованных сердечниках силовых элементов импульсных устройств//*Электрон. моделирование*. — 2014. — 36, № 2. — С. 107—111.

V.T. Chemerys, I.A. Borodiy, A.Ye. Marinchenko

#### SIMULATION OF THE PULSED ELECTRIC CURRENT PASSAGE ACROSS THE CONTACT SURFACES OF MULTILAYER ELECTRICAL CONDUCTIVITY

The author considers peculiarities of pulsed electric current passage across the border surfaces of electrodes when their electrical conductivity at the both surfaces is of a multilayer character. It was shown in the 2-D calculation model how the increase of the relative motion of electrodes led to the field and current concentration in the angular zone of contact. A set of different laws of electrical conductivity from layer to layer was taken. The results of simulation indicate the possibility to improve the current density distribution along the contact surface at some laws of electrical conductivity distribution from layer to layer of electrodes. It is shown that a decrease of electrical conductivity of surface layers especially at the moving electrode allows avoiding the extreme concentration of current density at the trailing edge of moving electrode even at the significant growth of the relative motion velocity of electrodes (up to 2.5 km/sec).

*Keywords:* sliding electric contact, transient process, pulsed current switching on, multilayer electrical conductivity.

REFERENCES

1. Chemerys V.T. Key problems of railgun: new concept for their resolution // Procedia Engineering. — 2013. — Vol. 58. — P. 377—383. Access in Internet:www.sciencedirect.com.
2. Kozlovsky V.V., Bychkovsky R.A., Svechnikov G.G., Zgursky A.V. Synthesis of non-uniform electromagnetic media. — Kyiv: Naukova Dumka, 1992. — 268 p. (in Russian).
3. Chemerys V.T., Borodiy I.A. Modeling of wave processes in the fine laminated cores at the electromagnetic elements of the pulsed devices. // Electronic Modeling. — 2014. — Vol. 36, № 2. — P. 107—111 (in Russian).

Поступила 31.03.14

*ЧЕМЕРИС Владимир Терентьевич, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доцент кафедры теоретической и прикладной физики Национального авиационного университета Украины. В 1962 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — импульсное электро-механическое преобразование энергии, физика импульсных электродинамических систем.*

*БОРОДИЙ Ирина Алексеевна, ассистент кафедры теоретической и прикладной физики Национального авиационного университета Украины. В 2001 г. окончила Национальный педагогический университет им. Драгоманова (г. Киев). Область научных исследований — электромагнитные процессы в силовых элементах импульсной техники.*

*МАРИНЧЕНКО Анна Евгеньевна, канд. техн. наук, доцент кафедры теоретической и прикладной физики Аэрокосмического ин-та Национального авиационного университета Украины. В 1996 г. окончила Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический ин-т». Область научных исследований — физика взаимодействия металлов с механическими, тепловыми и электромагнитными нагрузками.*

